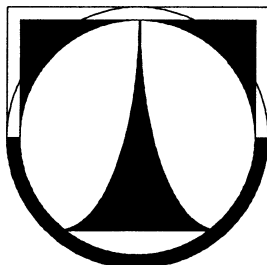


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



**PODVOZEK ZÁVODNÍHO VOZIDLA
CHASSIS OF A RACING CAR**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

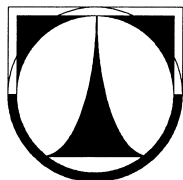
Martin Dorotka

Květen 2011

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



Obor B2341

Stroje a zařízení

Zaměření 2301R022

Dopravní stroje a zařízení

PODVOZEK ZÁVODNÍHO VOZIDLA

CHASSIS OF A RACING CAR

Bakalářská práce

KVM – BP – 198

Martin Dorotka

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Robert Voženílek, TU v Liberci, KVM

Konzultant bakalářské práce: pan Jiří Gottwald, Blue engineering s.r.o.

Počet stran: 41

Počet obrázků: 23

Počet příloh: 6

Počet výkresů: 0

Květen 2011



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení **Martin D O R O T K A**

obor **B2341 Strojírenství**

zaměření **2302R022 stroje a zařízení
dopravní stroje a zařízení**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

PODVOZEK ZÁVODNÍHO VOZIDLA

Zásady pro vypracování:

(uved'te hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Proved'te rozbor typů podvozků používaných u závodních vozidel.
2. Proved'te rozbor silového zatížení působícího na podvozek vozidla.
3. Proved'te kinematickou analýzu vybraného zavěšení podvozku ve vybraném softwaru a výsledky analyzujte.
4. Během řešení spolupracujte s firmou Blueengineering s.r.o., jenž poskytne podklady pro řešení bakalářské práce.

Forma zpracování bakalářské práce:

Průvodní zpráva - v rozsahu cca 40 stran textu, vč. příloh.

Text celé bakalářské práce včetně příloh bude v elektronické formě přiložen na CD nosiči k tištěnému svazku originálu bakalářské práce.

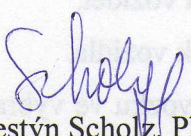
Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

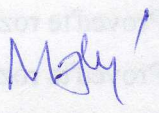
- [1] VLK, F.: Podvozky motorových vozidel. Nakladatelství a vydavatelství Vlk. BRNO 2001
- [2] SAJDL, J.: Elastokinematický model přední nápravy a metoda jeho verifikace. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci 2009

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Robert Voženílek, TU v Liberci, KVM

Konzultant bakalářské práce: pan Jiří Gottwald., Blueengineering s.r.o.




prof. Ing. Celestýn Scholz, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.
děkan

V Liberci dne 1. 11. 2010

Platnost zadání bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ).
Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

PODVOZEK ZÁVODNÍHO VOZIDLA

Anotace

Tato práce se zabývá tematikou podvozků závodních vozidel. Zahrnuje přehled používaných typů konstrukcí zavěšení s ohledem na různorodé automobilové disciplíny. Popisuje podvozek jednoho konkrétního závodního vozu a věnuje se problematice nastavování podvozku.

Klíčová slova: podvozek, zavěšení kol, geometrie kol, lichoběžníkové zavěšení, automobilový sport, závodní vůz, nastavení podvozku

CHASSIS OF A RACING CAR

Annotation

This thesis deals with the chassis of race cars. It includes an overview of the types of suspension in regard to different kinds of car races. It describes one concrete chassis of the race car and considers the issue of setting up the chassis.

Key words: chassis, suspension, wheel alignment, double-wishbone suspension, motorsports, race car, chassis set-up

Desetinné třídění:

Zpracovatel:

TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra vozidel a motorů

Dokončeno :

2011

Archivní označení zprávy:

Prohlášení k využívání výsledků bakalářské práce

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom(a) povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

V dne

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Robertovi Voženílkovi, za cenné rady a pomoc při tvorbě této práce, dále pak společnosti Blue engineering s.r.o., a to především panu Jiřímu Gottwaldovi, za ochotu, odbornou pomoc a poskytnutí veškerých dat. Dále bych chtěl poděkovat rodičům za podporu během celého studia.

Seznam symbolů a jednotek

| | | |
|------------|--|--------|
| γ | odklon kola | [°] |
| δ_0 | sbíhavost kol | [°,mm] |
| σ | příklon rejdové osy | [°] |
| τ | záklon rejdové osy | [°] |
| r_0 | poloměr rejdu | [mm] |
| n_k | zavlek | [mm] |
| t_p | rozchod kol přední nápravy | [mm] |
| mm | milimetr | |
| °,deg | úhlový stupeň | |
| °C | stupeň Celsia | |
| kg | kilogram | |
| bar | jednotka tlaku (1 bar = 0,1 MPa) | |
| ccm | jednotka objemu - centimetr krychlový | |
| hp | jednotka výkonu – koňská síla (horsepower) | |
| 4WD | pohon všech kol (4 wheel drive) | |

Definice pojmů

Telemetrie – Soubor dat získaných při jízdě vozidla. Od okamžiku nastartování pohonné jednotky se začnou ukládat data do zařízení zvaného datalogger, ze kterého jdou zpětně vyčíst a vyhodnotit. Uložená data obsahují například údaje o otáčkách motoru, zařazeném rychlostním stupni, pozici škrticí klapky, příčném a podélném zrychlení, natočení volantu, teplotách oleje, chladicí kapaliny, nasávaného vzduchu či údaje o tlaku oleje i paliva. Správným vyhodnocením těchto dat a následně odpovídající reakcí lze dosáhnout lepších výsledků na závodní trati, nebo například předejít případnému poškození pohonné jednotky.

Uniball – Speciální kloubové ložisko používané u sportovních a závodních vozů. Umožňuje spojení součástí zavěšení a díky své konstrukci zajišťuje snadné nastavení například délek ramen nebo řídicí tyče. Nahrazuje uložení prvků zavěšení

v pryžových lůžkách, které se běžně používá u sériových vozů kvůli zvýšení komfortu jízdy a tlumení rázů. Použití kloubových ložisek uniball tak zajistí přesné vedení kola. Nevýhodou je citelnější přenos rázů do karoserie nebo rámu vozu.



Obr. 1 Ložisko uniball [23]

Diferenciál ATB – Samosvorný diferenciál umožňující automatické rozdělování krouticího momentu mezi poháněná kola pomocí šnekového mechanismu.

Anti-dive/anti-squat – Setrvačná síla vzniklá při brzdění/akceleraci vytváří klopný moment vzhledem k příčné ose vozidla, který způsobuje předklánění/zaklánění karoserie. Současně také způsobuje změnu vertikálního zatížení kol. Prvky zavěšení kol lze uspořádat tak, aby bylo předklánění/zaklánění karoserie potlačeno. Míru „potlačení“ udávají hodnoty anti-dive/anti-squat [%]. [2]

Bump-steer – Závislost hodnoty sbíhavosti kol na aktuální poloze kol ve vertikálním směru, resp. rozsah změny sbíhavosti při propružení kol.

Brake-balance – Systém umožňující optimální rozložení brzdného účinku mezi přední a zadní nápravu.

Směrová stabilita vozu – Schopnost vozidla dodržovat řidičem stanovený směr jízdy při působení boční síly (průjezd zatáčkou). Základní chování vozu lze rozdělit na neutrální (vozidlo zatáčí tak jak je řízeno), nedotáčivé (vozidlo zatáčí méně než je řízeno) a přetáčivé (vozidlo zatáčí více než je řízeno). Směrovou stabilitu vozu ovlivňuje mnoho faktorů jako například poloha těžiště vozu, nastavení podvozku (geometrie kol, tuhost příčných stabilizátorů,...), boční tuhost pneumatik, tlak vzduchu v pneumatikách a další. [22]

Obsah

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | ÚVOD | 10 |
| 2 | ZÁKLADNÍ POJMY, SOUČASNÁ SITUACE | 11 |
| 2.1 | ZÁKLADNÍ POJMY | 11 |
| 2.2 | GEOMETRIE KOL | 12 |
| 2.2.1 | Úhel odklonu kola | 12 |
| 2.2.2 | Sbíhavost kol | 13 |
| 2.2.3 | Příklon rejdové osy | 14 |
| 2.2.4 | Poloměr rejdu | 14 |
| 2.2.5 | Záklon rejdové osy, závlek | 15 |
| 2.3 | OBEČNÁ CHARAKTERISTIKA PODVOZKU ZÁVODNÍHO VOZU | 16 |
| 2.4 | PŘEHLED POUŽÍVANÝCH TYPŮ ZAVĚŠENÍ V MOTORSPORTU | 17 |
| 2.4.1 | RALLY – WRC (World Rally Championship) | 18 |
| 2.4.2 | RALLYCROSS – ERC (European Rallycross Championship) | 19 |
| 2.4.3 | GT4 European Cup | 20 |
| 2.4.4 | F1 | 21 |
| 3 | LICHOBĚŽNÍKOVÉ ZAVĚŠENÍ KOL | 22 |
| 3.1 | SPECIFIKACE VOZU – GINETTA G50 | 22 |
| 3.2 | SPECIFIKACE LICHOBĚŽNÍKOVÉHO ZAVĚŠENÍ VOZU GINETTA G 50 | 23 |
| 4 | KINEMATICKÝ MODEL ZAVĚŠENÍ | 24 |
| 4.1 | LOTUS SUSPENSION ANALYSIS v 5.01c | 24 |
| 4.2 | ZMĚNA SBÍHAVOSTI KOL PŘI PROPRUŽENÍ – „BUMP-STEER“ | 27 |
| 4.3 | ZMĚNA ODKLONU KOL PŘI PROPRUŽENÍ | 29 |
| 5 | MOŽNOSTI NASTAVENÍ PODVOZKU VOZU GINETTA G50 | 31 |
| 5.1 | VLIV NASTAVENÍ SOUČÁSTÍ PODVOZKU NA CHOVÁNÍ VOZU | 31 |
| 5.1.1 | Pneumatiky, geometrie kol | 31 |
| 5.1.2 | Brzdový systém | 32 |
| 5.1.3 | Odpružení | 33 |
| 5.1.4 | Příčný stabilizátor | 33 |
| 5.2 | VLIV NASTAVENÍ SBÍHAVOSTI – ZADNÍ NÁPRAVA | 34 |
| 6 | ZACHYCENÍ SIL NA LICHOBĚŽNÍKOVÉ NÁPRAVĚ | 37 |
| 7 | ZÁVĚR | 38 |
| | Seznam použité literatury | 39 |
| | Seznam příloh | 41 |

1 ÚVOD

Automobilový sport je sport jako každý jiný, je to boj o drahocenný čas. Je sportem také velice finančně náročným. Konstrukteři továrních týmů se snaží udělat své značce co nejlepší jméno, někdy nehledě na množství vynaložených prostředků. Nezanedbatelná je mnohdy spolupráce s marketingovými plány daného výrobce automobilů, s cílem udělat co nejlepší dojem na potenciálního zákazníka. V konstrukci závodních vozů jsou používány nejnovější technologie a také nejvyšší kvalitní materiály, zaručující optimální požadované vlastnosti, s důrazem na vysokou pevnost a zároveň nízkou hmotnost. Aby byl závodní tým schopný vyhrávat soutěže, musí mít k dispozici závodní vůz, který zaručuje stoprocentní funkčnost mnohdy v opravdu extrémních podmínkách a v jakékoli rychlosti. Je to výsledek náročné práce týmu lidí, kteří nesmějí opomenout ani jediný detail, který by v důsledku znamenal neúspěch projektu.

Jednou z nejdůležitějších částí závodního vozu a mnohdy i klíčem k úspěchu je podvozek vozu. Na podvozky závodních vozů jsou kladeny velmi vysoké nároky a při vývoji je mu věnována značná pozornost. Podvozek musí zajišťovat co nejlepší jízdní vlastnosti s ohledem na trakci, profil tratě, ale zároveň i bezpečnost jezdce. Prioritou ale zůstává dosažení co nejrychlejšího času a to i za cenu například horší ovladatelnosti vozu, nebo extrémní zátěže pneumatik. Podvozek závodního vozu získává díky své speciální konstrukci možnost snadného nastavení jak geometrie kol a rejdových os, tak například světlé výšky nebo tuhosti podvozku. Jednou ze součástí podvozku je samotný způsob zavěšení kol, jehož konstrukcí lze ovlivnit řadu důležitých parametrů.

Cílem této práce je popsat současnou situaci v použití různých typů zavěšení v oblasti motorsportu s ohledem na specifika jednotlivých závodních disciplín. Dalším úkolem je provést kinematickou analýzu jednoho konkrétního podvozku závodního vozu včetně vytvoření funkčního kinematického modelu ve vybraném softwaru s následným vyhodnocením. Dalším bodem je popis základního silového působení na zavěšení vybraného vozu.

2 ZÁKLADNÍ POJMY, SOUČASNÁ SITUACE

2.1 ZÁKLADNÍ POJMY

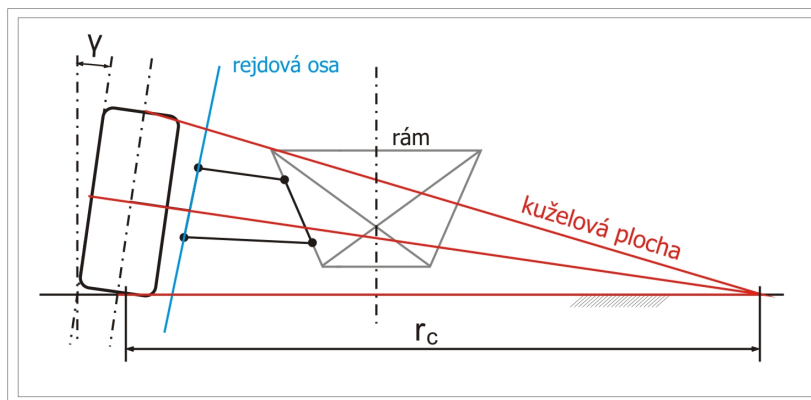
Podvozek vozu je tvořen přední a zadní nápravou. Náprava je část podvozku, jejímž prostřednictvím jsou dvě protilehlá kola připevněna na karoserii nebo na rám vozidla. Konstrukce nápravy musí zajistit pevné a přesné vedení všech kol a zároveň zabezpečit přenos všech sil a momentů, které musí náprava přenést na karoserii, nebo na rám vozu. Každá náprava je obecně tvořena několika funkčními celky obsahujícími právě zavěšení kol, uložení kol, odpružení kol, brzdící soustavu, případně hnací a řídicí ústrojí. Samotné zavěšení kol znamená způsob připojení kol ke karoserii nebo k rámu vozidla. Jeho základní funkcí je zajištění: relativního pohybu kola vůči karoserii nebo rámu vozidla při propružení kola, eliminace nežádoucích pohybů kola (boční posuv a naklápění kola) a zajištění optimálního vedení kola v různých jízdních situacích. Zavěšení kola také přenáší již zmiňované silové a momentové účinky mezi kolem a karoserií nebo rámem. Základní rozdělení typů zavěšení kol lze provést na zavěšení závislé a nezávislé. V této práci se budu zabývat pouze zavěšením nezávislým, jelikož u moderních závodních speciálů se vyskytuje mnohem častěji. O nezávislém zavěšení hovoříme v případě, že každé kolo je samostatně připevněno ke karoserii nebo rámu vozidla nezávisle na protilehlém kole. Propružení jednoho kola tak neovlivní pohyb kola druhého. Vertikální pohyb pravého a levého kola je jen nepřímo ovlivněn pohybem karoserie a zkrutným stabilizátorem, který zabraňuje naklápění karoserie v zatáčkách. Díky tomu, že je každé kolo zavěšeno nezávisle, klesá hmotnost neodpružených částí podvozku, protože v případě poháněné nápravy je diferenciál s rozvodovkou připevněn k rámu vozu. Mezi nejpoužívanější zástupce tohoto typu patří zavěšení lichoběžníkové, McPherson nebo víceprvkové. [1]

2.2 GEOMETRIE KOL

Geometrická poloha kol vozu jak na přední, tak zadní nápravě, má významný vliv na jízdní vlastnosti, bezpečnost a ovladatelnost vozu. Správná pozice kol vůči vozovce a vhodné nastavení rejdových os musí zajistit, aby se při jízdě kola v každé situaci odvalovala a řízení bylo stabilní a lehké. Proto mají kola a rejdové osy určité odchylky od svislé roviny, které tyto vlastnosti zajišťují. [1] V oblasti automobilových závodů však není prioritou docílit ideálního odvalování kola vzhledem k životnosti pneumatik či lehkého řízení, ale pomocí vhodně nastavené geometrie kol zajistit maximální dynamiku vozu a to i za cenu například horší ovladatelnosti vozu či extrémní zátěže pneumatik. Prioritou tak zůstává výsledný čas na stopkách. Pro úplnost jsou zde uvedeny základní geometrické odchylky kol od ideálních svislých rovin, které mají vliv na chování a řízení vozu. Většina hodnot těchto geometrických odchylek jde díky konstrukci podvozku závodního vozu velice rychle a relativně snadno měnit a tím přizpůsobit podvozek aktuálním jízdním podmínkám, nebo jízdnímu stylu daného jezdce. Parametry geometrie budou vztaženy a vysvětleny na lichoběžníkovém typu zavěšení. Pozn.: Rejdová osa je u lichoběžníkového zavěšení tvořena spojnici vnějších kloubů ramen.

2.2.1 Úhel odklonu kola

Odklon kola je dán úhlem, který svírá střední rovina kola a svislá osa vozidla, v obrázku 2 je označen symbolem γ . Kladné hodnoty odklonu znamenají, že se horní část kola odklání směrem vně vozidla. Naopak záporné hodnoty znamenají, že se horní část kola přiklání ke středu vozu. U závodních vozů se většinou nastavuje záporný odklon již ve statické jízdní výšce, při průjezdu zatáčkou je tak na vnějším, zatíženém, kole využita

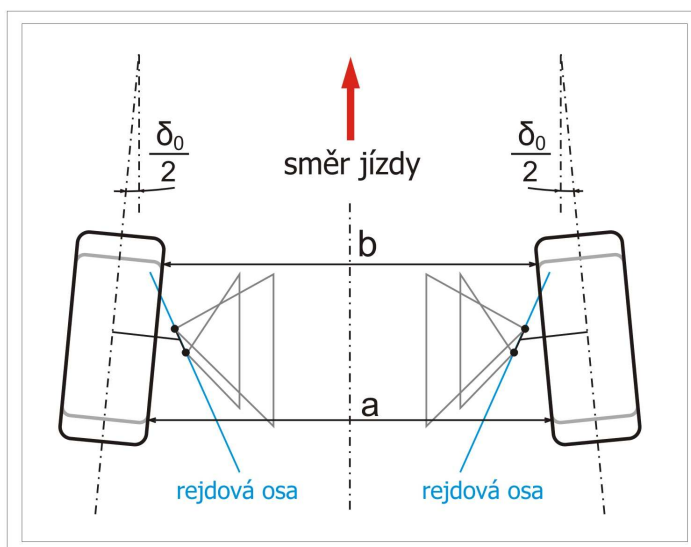


Obr. 2 Záporný odklon kola [25]

maximální kontaktní plocha pneumatiky s vozovkou. Pneumatika tak přenáší maximální boční sílu a tím se předchází vzniku nedotáčivého smyku v případě přední a přetáčivého smyku v případě zadní nápravy. U nezávislého zavěšení dochází při vertikální výchylce kola ke změně úhlu odklonu kola. Tato změna má vliv na chování vozu při průjezdu zatáčkou. Vlivem změny odklonu vzniká ve stopě pneumatiky boční síla, která má za následek větší namáhání zavěšení, což vzhledem ke konstrukci závodního podvozku (zesílená ramena, použití uniball ložisek,...) nemá téměř žádný význam. Vychýlením osy kola z rovnovážné polohy vzniká také gyroskopický moment vztahující se k rejdové ose, který je následně přenášen do řízení.

2.2.2 Sbíhavost kol

Sbíhavost kol udává úhel, který svírají střední roviny dvou protilehlých kol téže nápravy. Správným nastavením sbíhavosti se kompenzuje nepříznivý vliv odklonu kola, který způsobuje větší opotřebení pneumatik. Například kolo se záporným odklonem tvoří ve styku s vozovkou kuželovou plochu a má tendenci se odvalovat po kružnici o poloměru r_c (viz. obr.2), jejíž střed leží v průsečíku osy kola s vozovkou, směrem k vodorovné podélné ose symetrie vozu. Z tohoto důvodu dochází k nerovnoměrnému opotřebení pneumatik, což ale, jak již bylo zmíněno, pro oblast motorsportu není rozhodující faktor. Aby se kola odvalovala správně, měl by být záporný odklon redukován mírnou rozbíhavostí (přibližně 10% úhlu odklonu kola). Při propružení nedochází jen ke změně odklonu kol, ale velmi často dochází také ke změně hodnoty sbíhavosti kol. Tento



Obr. 3 Sbíhavost kol [25]

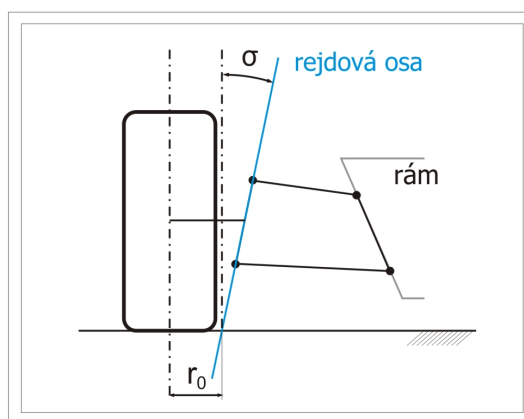
fakt bývá označován jako bump-steer. Sbíhavost značně přispívá ke stabilizaci vozu při jízdě v přímém směru a brání rozkmitání kol. O sbíhavosti hovoříme, pokud vzdálenost mezi ráfky ve výšce středu kola na předním okraji (b) je menší než

vzdálenost mezi ráfky na zadním okraji (a). V opačném případě se jedná o rozbíhavost. Sbíhavost se měří jako úhlová odchylka nebo právě jako rozdíl již zmiňovaných vzdáleností.

Určení hodnoty úhlu sbíhavosti : $\delta_0 = \arcsin \frac{b-a}{d_r}$...kde d_r je průměr ráfku. (1)

2.2.3 Příklon rejdové osy

Příklon rejdové osy je průmět úhlu sevřeného mezi rejdovou osou a podélnou svislou rovinou vozidla. V obrázku 4 je označen symbolem σ . Příklon rejdové osy má podstatný vliv na vrácení rejdových kol do přímého směru. Při vytočení kol do rejdu se vozidlo nad touto nápravou mírně nadzvedne. Po uvolnění volantu se díky vratnému momentu, který je reakcí na vychýlení kol z přímého směru (sílu kterou vyvolal řidič při natáčení volantu), má náprava tendenci vrátit se do původní, nejnižší, pozice a to pozice kol v přímém směru.



Obr. 4 Příklon rejdové osy [25]

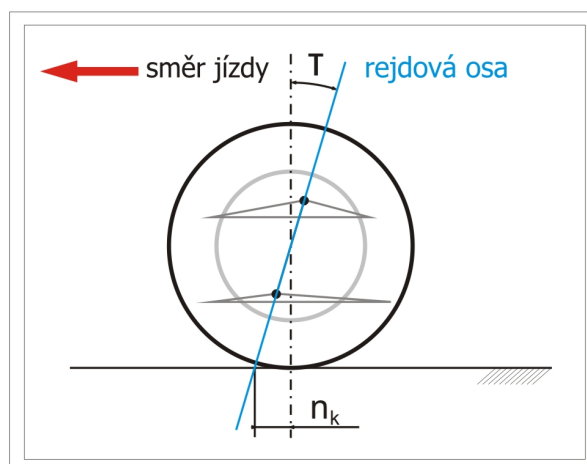
2.2.4 Poloměr rejdu

Poloměr rejdu r_0 je vzdálenost mezi průsečíkem rejdové osy s rovinou vozovky a středem styku pneumatiky s vozovkou. Pokud leží tento průsečík vně střední podélné roviny kola pak se jedná o záporný poloměr rejdu, v opačném případě se jedná o kladný poloměr rejdu (viz. obr.4). S rostoucím poloměrem rejdu se zvyšuje citlivost nápravy na podélné síly (brzdění, akcelerace, vliv valivých odporů) a také se zvětšuje potřebná síla, která musí být vynaložena řidičem při požadované změně směru. Naopak malý poloměr rejdu ztěžuje natáčení kol na místě (místo odvalování smyk).

2.2.5 Zákłon rejdové osy, závlek

Průmět úhlu mezi rejdovou osou a svislou příčnou rovinou do podélné svislé roviny vozidla se nazývá zákłon rejdové osy (T). Pokud je rejdová osa zakloněna vzad, hovoříme o kladných hodnotách. Zákłon rejdové osy napomáhá vracení kol do přímého směru, má na řízení stabilizační účinek a ovlivňuje hodnoty odklonu kol v rejdu na řízené nápravě.

Závlek (n_k) je vzdálenost mezi dotykem pneumatiky s vozovkou a průsečíkem rejdové osy s vozovkou promítnutá do roviny rovnoběžné s podélnou svislou rovinou. Pokud leží průsečík rejdové osy s vozovkou před středem styku pneumatiky s vozovkou, jedná se o kladnou hodnotu závleku. Kolo je v tomto případě vlečeno a napomáhá tak vracení kol do přímého směru.

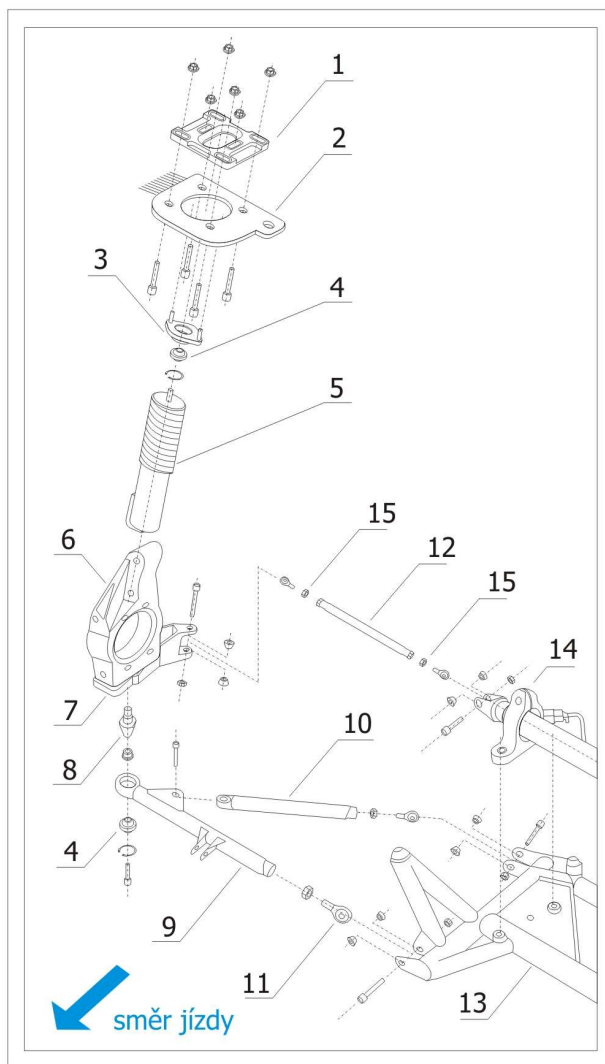


Obr. 5 Zákłon r. osy, závlek [25]

Chování vozu však neovlivňuje pouze nastavení geometrie kol a rejdových os, ale významný vliv má také například použití odlišných příčných stabilizátorů na přední a zadní nápravě, nebo tlak vzduchu v pneumatikách. Jeho změnou lze snadno a rychle ovlivnit například nedotáčivou/přetáčivou charakteristiku vozidla a reagovat tak na případnou změnu jízdních podmínek. V oblasti motorsportu neexistují konkrétní optimální hodnoty nastavení podvozku, a proto nastavení závodních speciálů vychází spíše ze zkušeností a z mnoha dat získaných při testování.

2.3 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA PODVOZKU ZÁVODNÍHO VOZU

Závodní podvozek se od podvozku sériového vozu díky odlišným požadavkům výrazně liší, ať už svou konstrukcí, tak například používanými materiály. Rozsah odlišností je ale často limitován pravidly a proto se rozdíly mohou lišit s ohledem na různé automobilové disciplíny. Pro ukázkou základních odlišností konstrukce závodního podvozku jsem použil přední nápravu závodního speciálu VW Polo Mk.4 S1600 D1A (viz. obr. 6), kde je použito nezávislé zavěšení typu McPherson, stejně jako na sériovém modelu. Podvozek tohoto vozu odpovídá předpisům Mezinárodní automobilové federace FIA, příloha J - článek 255. Výchozími body konstrukce zavěšení jsou upevňovací body nápravnice(13) ke karoserii vozu a body uložení pružící jednotky v podběhu kola, všechny tyto body musí po přestavbě zachovat svou původní polohu s danou tolerancí. Horní uložení tlumiče v karoserii(2) je vyrobeno z oceli 15CDV6 (chrom-molybden). Horní část uložení tlumiče – topmount(1) je vyroben z materiálu označovaného jako CERTAL (AlZn5Mg3Cu), který se vyznačuje vysokou pevností, nízkou hmotností a vynikající obrobiteľností. Pomocí podélného a příčného vedení upevňovacích šroubů v topmountu lze snadným přemístěním upevňovací misky(3) se speciálním kloubovým ložiskem - uniball(4) měnit příklon a záklon rejdové osy. Kombinace použitých tlumičů a pružin(5) umožňuje optimální nastavení jízdní výšky, tuhosti a především charakteristiky odpružení včetně regulace roztahovacího útlumu (Rebound), případně pomalorychlostní



Obr. 6 Přední náprava VW Polo S1600
[25]

a vysokorychlostní regulace stlačovacího útlumu (Low/High speed compression). Pružící jednotka je dále připevněna k hlavě kola(6), která je opět z materiálu CERTAL, stejně tak jako páka řízení(7). K spodní části páky řízení je připevněn rejdrový čep - kingpin(8). Spodní rameno(9) je doplněno reakční vzpěrou(10), a je uloženo v nápravnici opět pomocí uniball kloubů (nikoli pomocí pryžových lůžek). Díky tomu je zajištěna optimální a přesná kinematika pohybu kola. Na nápravnici je připevněno řízení(14), které pomocí řídicí tyče(12) zajišťuje řízení kol. Na každé straně řídicí tyče je opačný vnitřní závit, po povolení obou matic(15) lze otáčením tyče snadno měnit sbíhavost. Nápravnice je svařena z profilů z materiálu 15CDV6. Všechny použité materiály zajišťují vysokou pevnost a nízkou hmotnost za cenu vyšších nákladů. Důležitým faktorem je také snížení hmotnosti neodpružených hmot, což má příznivý vliv na namáhání součástí zavěšení a kvalitu odpružení.

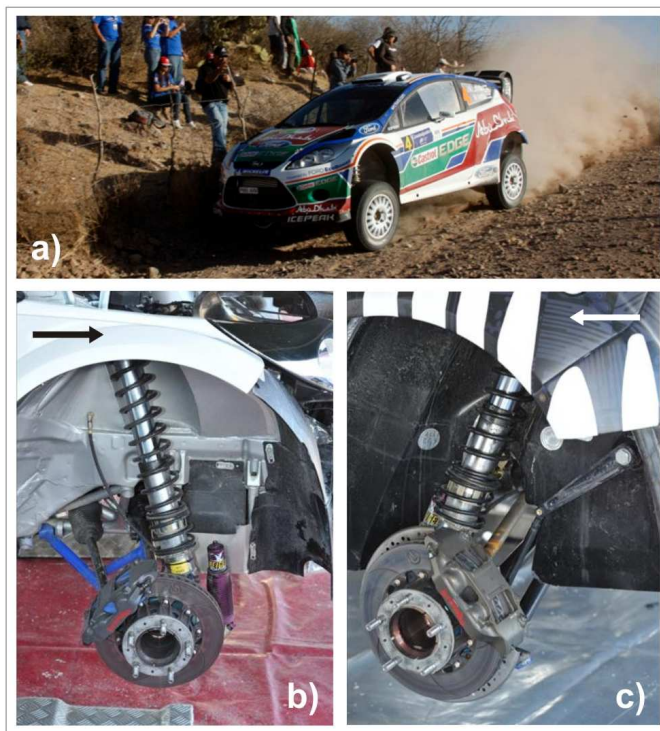
2.4 PŘEHLED POUŽÍVANÝCH TYPŮ ZAVĚŠENÍ V MOTORSPORTU

Automobilový sport zahrnuje mnoho disciplín. Závodní speciály se často musí vypořádat s velmi náročným, někdy i měnícím se charakterem tratě představujícím například kombinaci asfaltu s nezpevněným povrchem (šotolinou), či sněh s ledem (WRC, ERC,...). Z hlediska jízdních podmínek jsou opakem například závodní disciplíny odehrávající se na zpevněném hladkém asfaltovém okruhu (GT4, Formule1,...). Obecně existuje mnoho konstrukčních řešení problému zavěšení, které jsou závislé na mnoha faktorech, například právě na charakteru automobilové disciplíny, pro kterou je vůz primárně určen, nebo na koncepci vozu. Pokud se jedná o speciály, které mají původ v sériové výrobě (např. vozy kategorie WRC), pak použití typu zavěšení vychází většinou ze sériového modelu daného vozu. V některých případech možnost výběru zavěšení není pravidly povolena nebo není konstrukčně proveditelná. Následuje přehled vybraných automobilových disciplín s cílem popsat používané typy zavěšení. Některé vybrané disciplíny obsahují více podskupin a tříd, například rozdělení dle objemu motoru, či množství povolených úprav. U těchto disciplín bude vždy popisována nejvyšší vypsána třída.

2.4.1 RALLY – WRC (World Rally Championship)

Jedná se o seriál vícedenních vytrvalostních soutěží. Délka každého podniku se pohybuje v rozmezí 350 – 400 měřených kilometrů. Posádku vozu tvoří jezdec a spolujezdec a vozy vyráží na trať jednotlivě v minimálním rozestupu 1 minuty. Závodní tratě jsou běžné uzavřené komunikace. Profil tratě se liší pro každý závod, avšak v tomto šampionátu převládají soutěže na nepevném povrchu (například soutěže pořádané na území států jako Argentina, Řecko, Finsko). Výjimkou nejsou ani tratě pokryté sněhem a ledem (Švédsko), nebo čistě asfaltové soutěže (Německo, Španělsko). Konstrukteři tak musí navrhnout určitý kompromis s ohledem na odlišné profily tratí, avšak nutno zdůraznit, že mohou použít dvě verze podvozku a to asfaltový a šotolinový (viz. obr.6). Koncepce zavěšení ale musí zůstat v obou případech zachována. Tyto podvozky se liší například délkou pružící jednotky, odlišnými rameny či použitými stabilizátory. Obecně šotolinový podvozek je daleko více namáhán a musí být k tomu proto přizpůsoben. Závodní speciály nejvyšší kategorie WRC vycházejí z modelu své sériové verze. Základní křivky karoserie, které slouží k rozpoznání značky vozu, je však skoro jediný znak, který mají tyto vozy na první pohled společný. Vozy musí dle pravidel

pohánět přeplňovaný motor o objemu 1600 ccm s přímým vstřikováním paliva, výkon vozů se pohybuje kolem 300 hp a je přenášen na všechna čtyři kola. Některé parametry se však typově nesmí příliš odlišovat od sériového vzoru a proto všechny vozy této kategorie využívají v současnosti nejpoužívanější zavěšení typu McPherson jak na přední, tak na zadní nápravě. Zavěšení je tvořeno spodním trojúhelníkovým příčným ramenem a teleskopickou vzpěrrou, jejíž horní část je



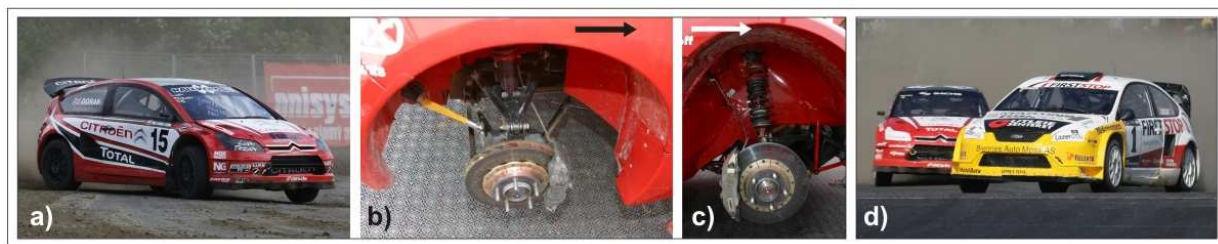
Obr. 7 Zavěšení vozu Ford Fiesta WRC

a) [12], b) [13], c) [14]

připevněna do podběhu karoserie. Hlavní výhodou je prostorově jednoduchá konstrukce a snadný přístup při údržbě podvozkových prvků. Jelikož tyto speciály využívají příčného uložení motoru, použití například lichoběžníkového zavěšení s optimálním průběhem geometrie není z důvodu malého zástavbového prostoru v příčném směru možné. Pro zachování maximální trakce je vyžadován co největší zdvih kola hlavně na rozbitých šotolinových cestách, kde kola často dosahují úplného vyvěšení (přejezd horizontů a nerovností) a to zavěšení McPherson splňuje.

2.4.2 RALLYCROSS – ERC (European Rallycross Championship)

Standardní závod seriálu mistrovství Evropy v rallycrossu se skládá z dvou závodních dnů a odehrává se na uměle vytvořeném závodním okruhu, kde délka jednoho kola je v rozmezí 950-1400 metrů s šířkou tratě 10-25 metrů. Trať musí být částečně tvořena asfaltovým povrchem (35-60%), zbytek tvoří zpevněná zemina nebo štěrk a profil tratě není tak členitý jako u předchozí disciplíny. Posádku vozu



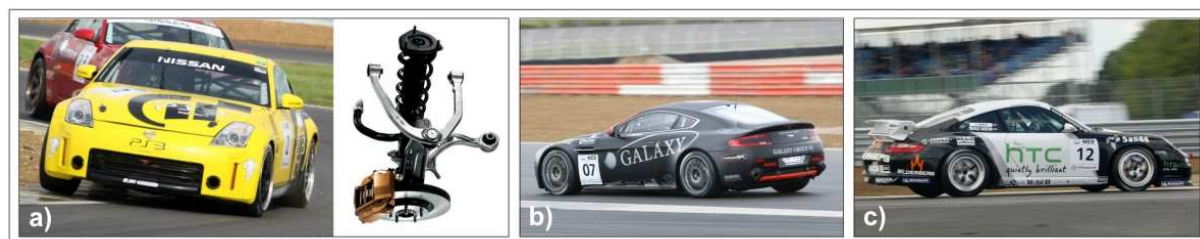
Obr. 8 Lichoběžníkové zavěšení vozu Citroën C4 D1, a) [15], b) [16], c) [16], d) [17]

tvoří pouze samotný jezdec. Hromadným startem na trať vyráží až šest vozidel. Vůz absolvuje během dvou závodních dnů zhruba 35 kilometrů. Závodní speciály třídy Supercars (dříve Divize 1) pohání dvoulitrové přeplňované pohonné jednotky disponující výkonem kolem 550 hp a krouticím momentem sahajícím k 900 Nm. Podoba vozu opět vychází ze sériových typů vozidel, avšak s mnohem větším rozsahem pravidly povolených úprav. Jednou z nich je možnost použití libovolné koncepce systému zavěšení. Jelikož tyto vozy většinou využívají podélného uložení motoru (4WD), zbývá tak dostatek místa pro zástavbu odlišné koncepce zavěšení. Nejčastějším případem bývá přestavba na lichoběžníkové zavěšení, které disponuje mnoha výhodami. Konstrukčně je tento typ zavěšení realizován dvěma příčnými trojúhelníkovými rameny a pružící jednotkou připojenou většinou k spodnímu z nich.

Uložením ramen v karoserii vozu a jejich geometrií lze snadno definovat požadovanou kinematiku pohybu kola a vhodně nastavit hodnotu anti-dive a anti-squat, které ovlivňují předklánění a zaklánění karoserie při brzdění, resp. při akceleraci. Pružící jednotka nemusí být tak odolná jako u typu McPherson, protože přenos podélných sil zajišťuje dvojice ramen. Z toho vyplývá nižší hmotnost, která je vyžadována. Jelikož rallycross patří mezi kontaktní sporty, tak další výhodou lichoběžníkového zavěšení je vyšší odolnost při případném kontaktu vozidel.

2.4.3 GT4 European Cup

Tento seriál šesti závodů se odehrává na uměle vybudovaném okruhu, jehož povrch tvoří čistý asfalt. Vůz je pouze pro jednoho jezdce a vzdálenost ujetá během závodu záleží na délce okruhu, například v případě belgického okruhu Spa (7 km) ujede nejrychlejší vůz kolem 300 měřených kilometrů, což odpovídá zhruba 40-ti odjetým okruhům. Na takto upraveném povrchu se daleko citelněji projevuje



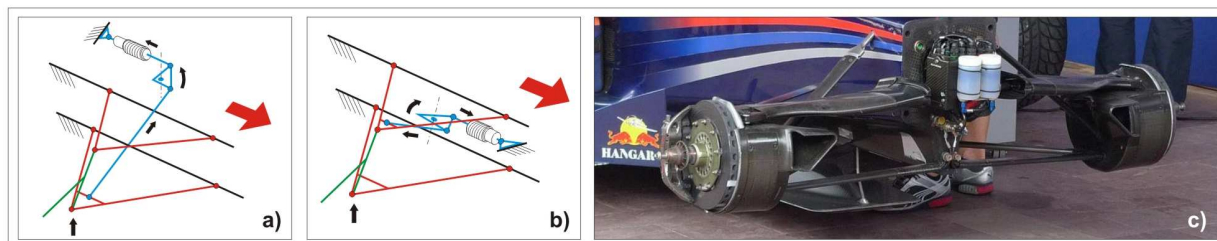
Obr. 9 a) Zavěšení Nissan 350z [18], b) AM Vantage [19], c) Porsche 911 [20]

například změna nastavení geometrie kol a díky porovnání časů jednotlivých ujetých kol, telemetrie a cítění jezdce lze vyhodnotit úspěšnost této změny. Výrazným vlivem se projevuje také účinnost aerodynamických prvků vozu, jako jsou spoilery, difuzory a podobně. Spektrum homologovaných vozů tohoto poháru obsahuje jak přestavěné sériové sportovní vozy (Aston Martin Vantage GT4, Nissan 350Z GT4), tak speciály vyrobené přímo pro závodní účely (Ginetta G50). Pohonné jednotky vozů se výkonnostně výrazně liší (od cca 210hp - 400hp), a proto je snaha o vyrovnání výkonu vozů. Výchozím parametrem pro srovnání je poměr hmotnost/výkon. Vyrovnání výkonu se docílí například přidáním závaží do výkonnějších vozů a v případě méně výkonných vozů přidáním aerodynamických prvků nebo použitím větší šíře pneumatik. U vozů tohoto seriálu musí zůstat koncepce zavěšení nezměněna od sériového vzoru. Způsob uložení ramen, přidání výztuh, použití

odlišných tlumičů, pružin i stabilizátorů je však povoleno. Mezi používané typy zavěšení patří zavěšení lichoběžníkové (Aston Martin Vantage GT4, Ginetta G50), víceprvkové (Nissan 350Z GT4), ale i zavěšení McPherson (přední náprava Porsche 911), jehož použití vyžaduje sice větší zástavbový prostor v svislém směru, ale vzhledem k malé jízdní výšce vozu, rozsahu propružení a absenci hnací hřídele (poloosy) je také vhodné.

2.4.4 F1

Obecně asi nejznámější motoristickou disciplínou je seriál závodů Formule 1 (F1). Závodní trati je opět okruh s asfaltovým povrchem. Monoposty, jedoucí po okruhu rychlostí přes 300km/h, jsou poháněny osmiválcovými atmosférickými motory o maximálním objemu 2,4 l. Tyto vozy představují technický vrchol v daném odvětví. Jízdní stabilita v takovýchto rychlostech nezáleží pouze na správně fungujícím podvozku, ale velká pozornost je upřena hlavně na aerodynamiku vozu. I z tohoto důvodu vozy F1 využívají lichoběžníkové zavěšení s poněkud odlišným systémem odpružení push/pull rod. Tlumič s pružinou tak není přímo připevněn



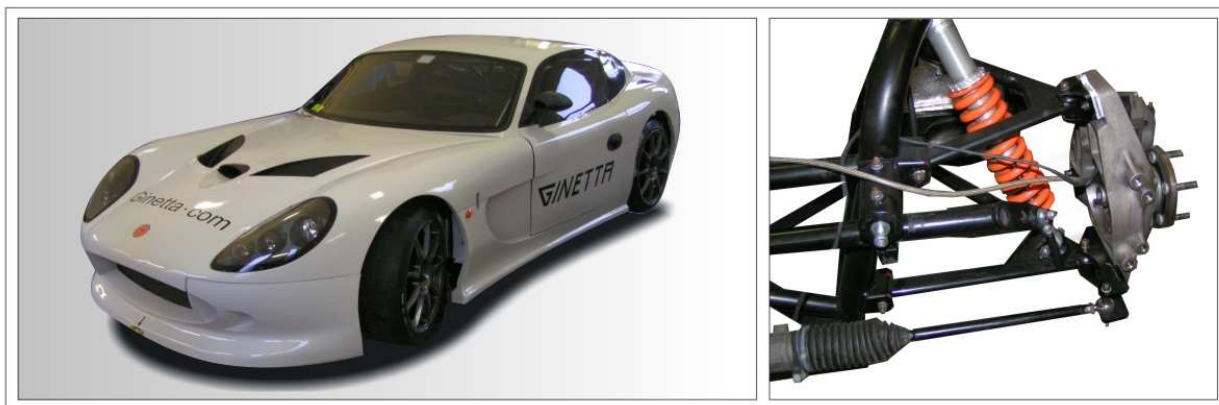
Obr. 10 a) zavěšení push-rod [25], b) pull-rod [25], c) zavěšení monopostu RBR [21]

k jednomu z ramen, ale je zabudován uvnitř skeletu a je ovládán pomocí tyče (rod), která buď tahem (pull) nebo tlakem (push) přenáší přes vahadlo zatížení, které vzniká při propružení kola. Ramena jsou vyrobena z kompozitních materiálů využívajících pevnost uhlíkových vláken (carbon) a mají speciální aerodynamický profil. Použitím kompozitních materiálů se výrazně sníží hmotnost neodpružených částí podvozku a celé zavěšení tak reaguje na případnou nerovnost daleko rychleji a přesněji. Častěji bývá použit typ push rod a to jak na přední, tak i zadní nápravě. Na přední nápravě je, kvůli aerodynamicky tvarované přídí vozu, použití typu pull rod nevhodné, ale na zadní nápravě lze tento typ využít. Jedním z vozů, který disponuje

tímto zavěšením, a to na zadní nápravě, je monopost týmu RedBull Racing. Výhoda tohoto uspořádání spočívá v tom, že tlumič s pružinou jsou umístěny ve spodní části monopostu, což má příznivý vliv na výšku těžiště vozu. Další výhodou je vhodnější typ zatížení tyče, která je při propružení namáhána tahem. Nepříznivým faktorem je, kvůli zástavbě, zmenšený prostor pro zadní difuzor, který ovlivňuje proudění vzduchu pod vozem.

3 LICHOBĚŽNÍKOVÉ ZAVĚŠENÍ KOL

V této práci se budu zabývat lichoběžníkovým typem zavěšení, které je díky své konstrukci typické převážně pro okruhové soutěžní vozy, u kterých během jízdy nedochází k velkému rozsahu propružení. Ve spolupráci se společností Blue engineering s.r.o. se zaměřím na podvozek konkrétního závodního speciálu značky GINETTA G50 připravovaného pro okruhové závody seriálu GT4.



Obr. 11 Lichoběžníkové zavěšení vozu Ginetta G50 – přední náprava [25]

3.1 SPECIFIKACE VOZU – GINETTA G50

Závodní vůz Ginetta G50 je osazen šestiválcovým motorem Ford o objemu 3,5 litru uloženým podélně v rámové konstrukci nad přední nápravou. Šestistupňová, sekvenčně řazená, převodovka přenáší výkon přesahující 300 hp pouze na zadní nápravu, kde se o rozložení krouticího momentu na samotná kola stará diferenciál ATB. Obě nápravy využívající lichoběžníkového zavěšení jsou osazeny kotoučovými brzdami, stavitelnými tlumiči, vpředu i vzadu jsou použity disky o průměru

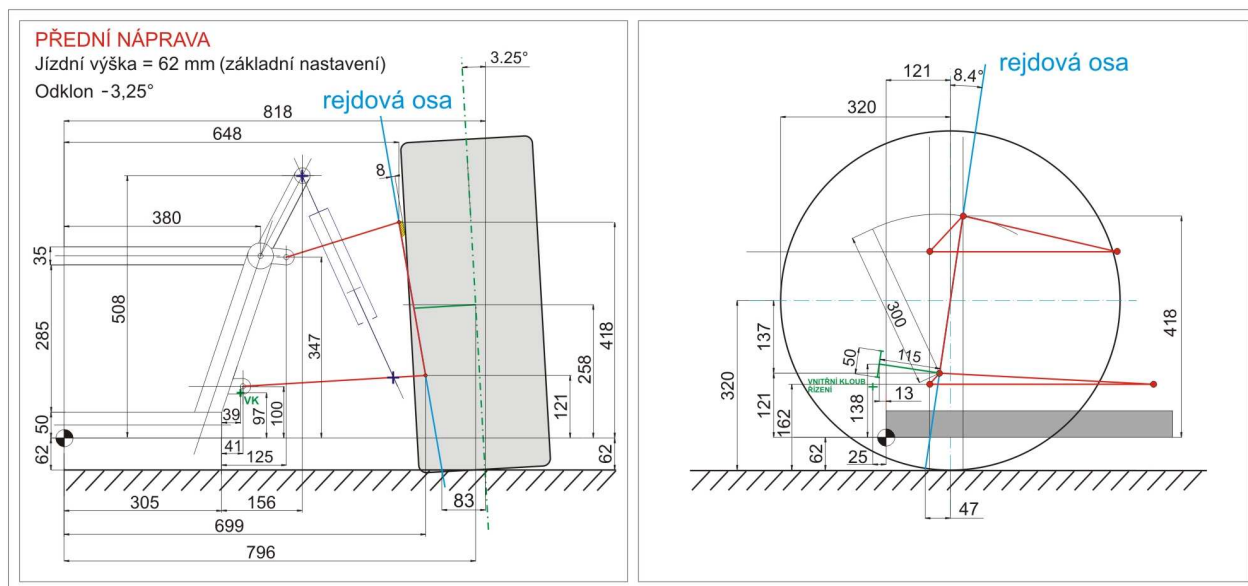
18 palců. Hmotnost vozu bez jezdce činí 994 kg, avšak minimální hmotnost, kterou dovolují pravidla seriálu GT4 je 1050 kg bez jezdce. Proto se vůz musí dovažovat. Kombinace přední řízené a zadní poháněné nápravy umožňuje jezdcovi ovládat oba konce vozu – tzv. „řízení plynem“.

3.2 SPECIFIKACE LICHOBĚŽNÍKOVÉHO ZAVĚŠENÍ VOZU GINETTA G 50

Lichoběžníkové zavěšení je z hlediska konstrukce tvořeno dvěma příčnými trojúhelníkovými rameny, z nichž spodní je delší než horní. Ramena jsou, stejně jako rámová konstrukce, svařena z oceli 15 230. Mezi těmito rameny je pomocí uniball kloubů sevřena hlava kola a mezi spodním ramenem a rámem vozu je upevněn tlumič s pružinou, opět s využitím uniball kloubů. Jak již bylo řečeno, hlavními výhodami tohoto zavěšení jsou nízké nároky na zástavbový prostor ve svislém směru. Díky tomu je toto zavěšení výhodné právě pro vozy s malou výškou nebo například pro monoposty. Výhodou je také nižší hmotnost v porovnání se zavěšením McPherson, protože svislá teleskopická vzpěra je nahrazena trojúhelníkovým ramenem, které umožňuje lepší rozložení podélných sil. U zavěšení McPherson jsou tyto síly a momenty přenášeny pouze přes teleskopickou vzpěru, což vyžaduje její mohutnou konstrukci a z toho plynoucí vyšší hmotnost celku. Další výhodou je, že při malé výchylce kola (jízda zatáčkou) dochází jen k malé změně rozchodu kol a téměř se nemění i rozvor. Tato skutečnost je také ovlivněna délkou ramen v příčném směru, čím delší rameno, tím vnější kloub ramene opisuje kružnici s větším poloměrem a při stejné výchylce kola se tak rameno vychýlí o menší úhel. Modifikovatelnými parametry geometrie kol tohoto závodního speciálu jsou odklon kola – pomocí podložek vkládaných mezi hlavu kola a vnější kloub horního ramene, a sbíhavost, která se nastavuje délkou řídicí tyče. Ostatní parametry by bylo možné změnit jinou geometrií trojúhelníkových ramen. Řízení je kvůli poloze pohonné jednotky umístěno před osou procházející středy kol nápravy.

4 KINEMATICKÝ MODEL ZAVĚŠENÍ

Pro analýzu kinematiky podvozku vozu Ginetta G50 bylo třeba vybrat vhodný software, zabývající se touto problematikou. Pro tvorbu kinematického modelu zavěšení jsem použil studentskou verzi programu Lotus Suspension Analysis, který byl vyvinut přímo pro návrh a optimalizaci podvozků vozidel.



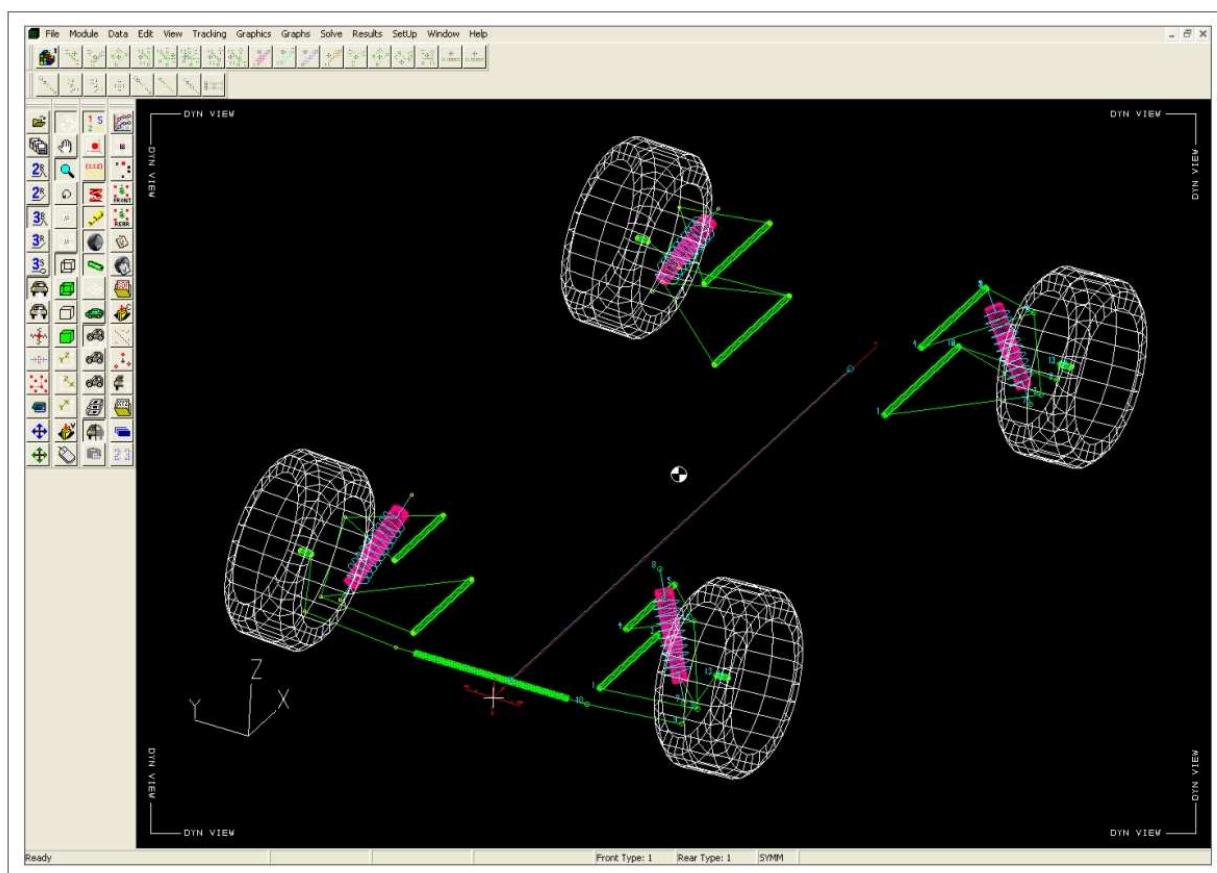
Obr. 12 Ukázka naměřených hodnot – přední náprava [25]

4.1 LOTUS SUSPENSION ANALYSIS v 5.01c

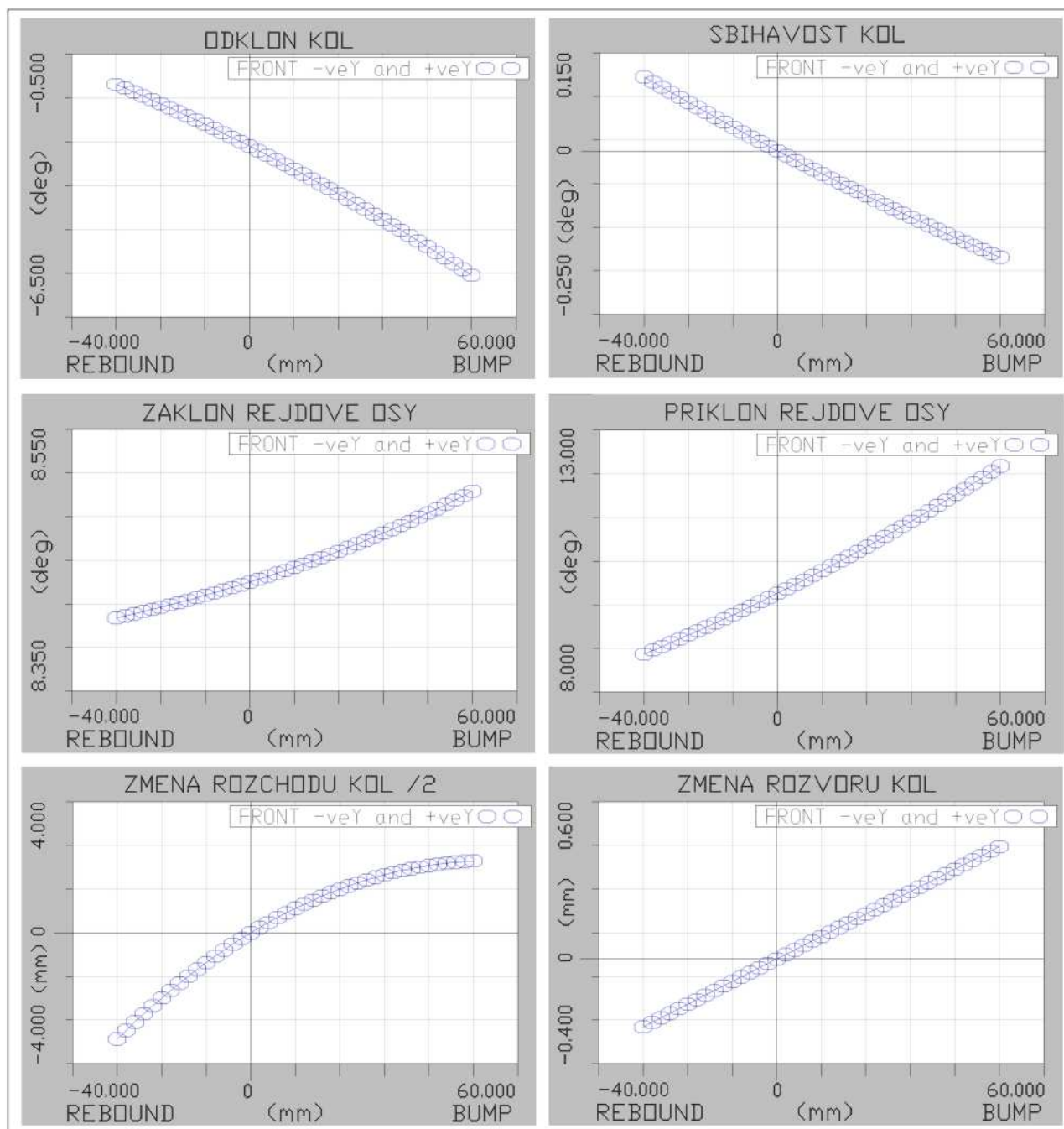
Tento software byl vyvinut oddělením Lotus engineering, které spadá přímo pod britského výrobce automobilů značky Lotus. Toto oddělení se nezabývá pouze tématikou podvozků vozidel, ale například také programy pro návrh soustavy vačkového hřídele a ventilů, nebo hřídele klikového, ojníc, pístů apod.

Program Lotus Suspension Analysis nabízí kompletní řešení jak z pohledu kinematiky, tak dynamiky podvozku v uživatelsky velmi přívětivém prostředí. Pro vytvoření funkčního kinematického modelu bylo třeba získat potřebná data, nutná k jeho definování. Mezi tyto data patřily souřadnice všech bodů zavěšení (body uložení ramen, souřadnice vnějších kloubů ramen, body uložení tlumiče s pružinou, vnitřní/vnější klouby řízení, poloha geometrického středu kola a další). Dále bylo

nutné zjistit rozvor náprav, rozchod kol, rozsah tlumičů, který definuje maximální a minimální pozici zavěšení při propružení resp. vyvěšení kola a rozměry použitých pneumatik. Některé z těchto hodnot byly získány z homologačního listu vozidla, avšak například kompletní polohu všech zmiňovaných bodů tento list neobsahuje, a tak bylo nutné tyto souřadnice naměřit. Měření proběhlo ve statické jízdní výšce a výchozí rovinou měření byla spodní rovina přední a zadní nápravnice. Pomocí hodnot základního nastavení geometrie podvozku daného výrobcem (příloha č.1) jsem sestavil kinematický model. Výstupem kinematického modelu byl přehled o změnách geometrie kol v závislosti na aktuální poloze kola/rámu v různých situacích jako například propružení kola při přejezdu nerovnosti - 3D Bump, nebo při naklopení rámu při průjezdu zatáčkou - 3D Roll (viz. příloha 3,4).



Obr. 13 Kinematický model vytvořený v programu Lotus Suspension Analysis [24]

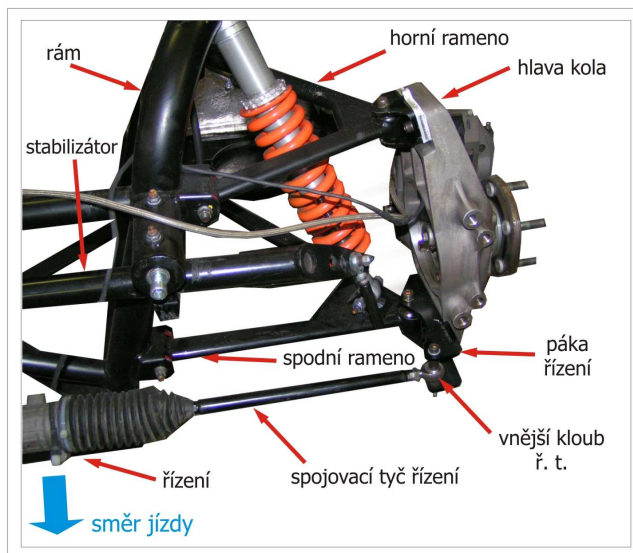


Obr. 14 Graficky zobrazená závislost změny sbíhavosti, odklonu kol, záklonu a příklonu rejdové osy, rozchodu a rozvoru kol v závislosti na vertikální poloze kola – přední náprava - situace 3D bump (například přejezd nerovnosti) [24]

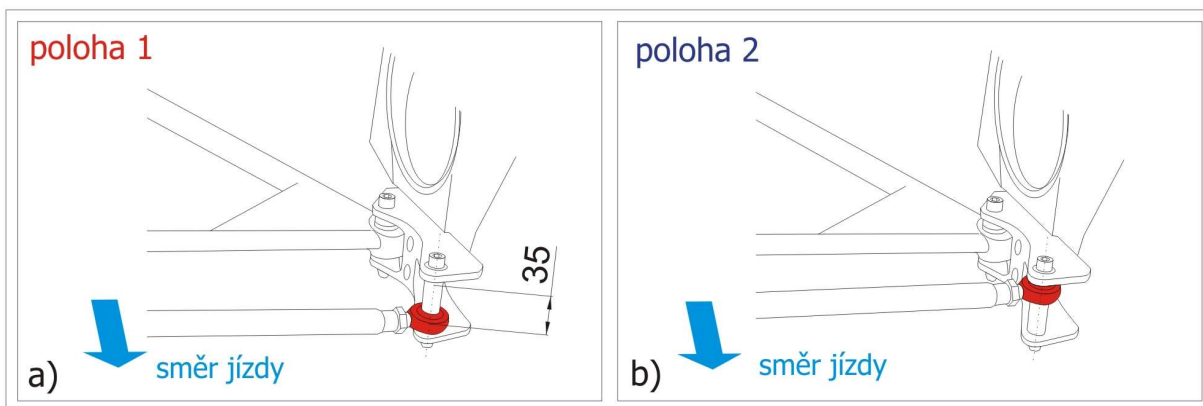
4.2 ZMĚNA SBÍHAVOSTI KOL PŘI PROPRUŽENÍ – „BUMP-STEER“

Jak již bylo zmíněno, při propružení kol dochází často ke změně jak odklonu, tak sbíhavosti kol. Toto platí i v případě vozu Ginetta G50. Změna sbíhavosti je na přední nápravě způsobená vazbou řídicí tyče mezi rámem a pákou řízení, jelikož při relativním pohybu zavěšení se kolo pohybuje po obecné křivce (souvisí s okamžitým středem klopení kola), zatímco vnější kloub řízení se pohybuje po kružnici, jejíž poloměr je dán délkou řídicí tyče. Obecně je závislost hodnoty sbíhavosti na aktuální poloze kola ve svislém směru označována jako bump-steer. Jedná se o samořízení nápravy nevycházející z impulsu daného řidičem. Pokud je rozsah bump-steer veliký, auto se chová

neklidně a nepředvídatelně, obzvláště při přejezdu nerovností, proto je snaha tento efekt co nejvíce minimalizovat. Toho lze v případě přední nápravy docílit nejjednodušeji změnou polohy vnějšího kloubu řídicí tyče pomocí různých kombinací rozpěrných podložek. Aby byla po této změně zachována hodnota sbíhavosti ve statické jízdní výšce, musí se přizpůsobit také délka řídicí tyče. Rozsah nastavení

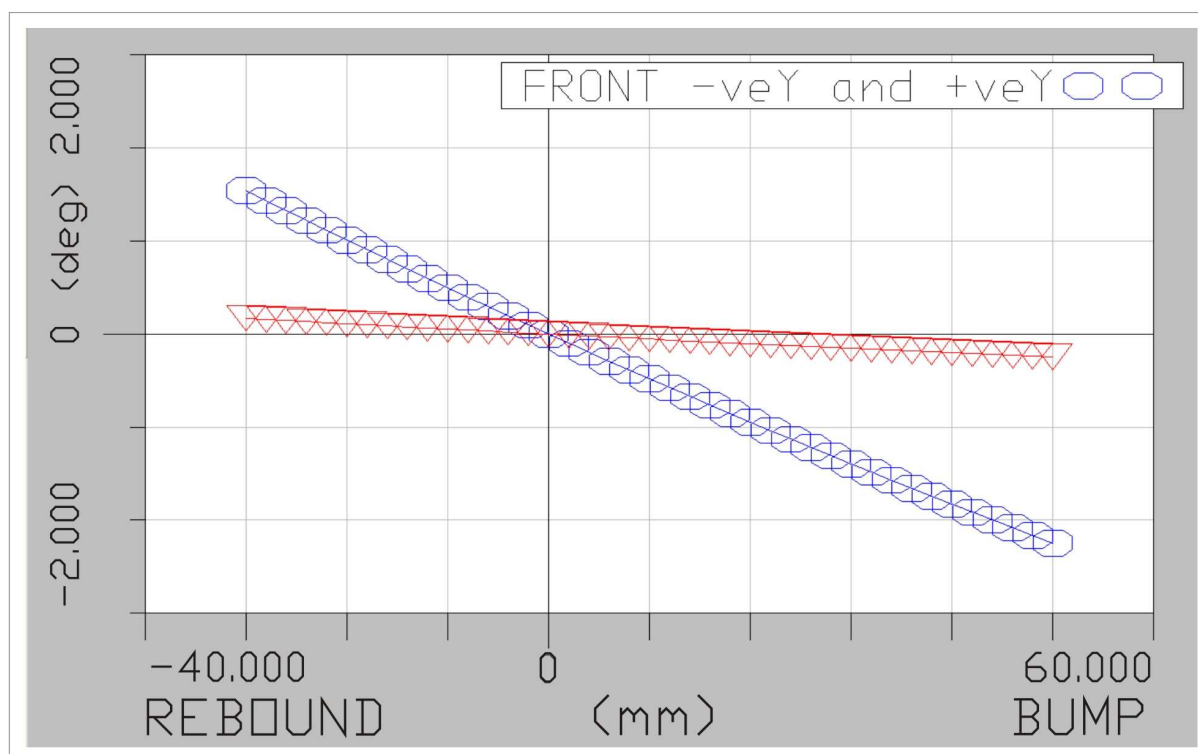


Obr. 15 Popis součástí přední nápravy vozu Ginetta G50 [25]



Obr. 16 Poloha vnějšího kloubu řídicí tyče, a) poloha1, b) poloha 2 [25]

je limitován konstrukcí páky řízení, která umožňuje nastavení vertikální polohy kloubu v rozsahu 35 mm. Díky programu Lotus Suspension Analysis bylo možné nasimulovat všechny možnosti polohy vnějšího kloubu řízení. Rozsah propružení kol je omezen maximální a minimální délkou tlumiče a byl s určitou tolerancí (doraz tlumiče) stanoven na 80 mm a to v poměru 30 mm - vychýlení ze statické jízdní výšky do úplného vyvěšení (rebound) ku 50 mm - vychýlení při opačném pohybu a to při maximálním stlačení tlumiče (bump). Nejmenší rozsah bump-steer vykazovala varianta nastavení, kdy byl vnější kloub řízení umístěn v co nejnižší možné poloze (obr. 16 a) a rozsah změny sbíhavosti se pohyboval od 0,12%0,96 mm (rebound) do -0,17%-1,36mm (bump). Při stlačení tlumiče (např. přejezd nerovnosti) se tak kolo ubírá do větší sbíhavosti a při opačném pohybu naopak. Absolutní hodnota sbíhavosti pak záleží na počátečním nastavení sbíhavosti v statické výšce. Zvyšováním vertikální polohy kloubu roste rozsah změny sbíhavosti. Při nastavení, kdy byl kloub umístěn naopak v nejvyšší možné poloze (obr. 16 b), se rozsah bump-steer zvětšil na 1,03%8,22mm (rebound), resp. -1,50%-11,9 7mm (bump), což jsou hodnoty, které by nepříznivě ovlivnily stabilitu vozidla hlavně při jednostranném



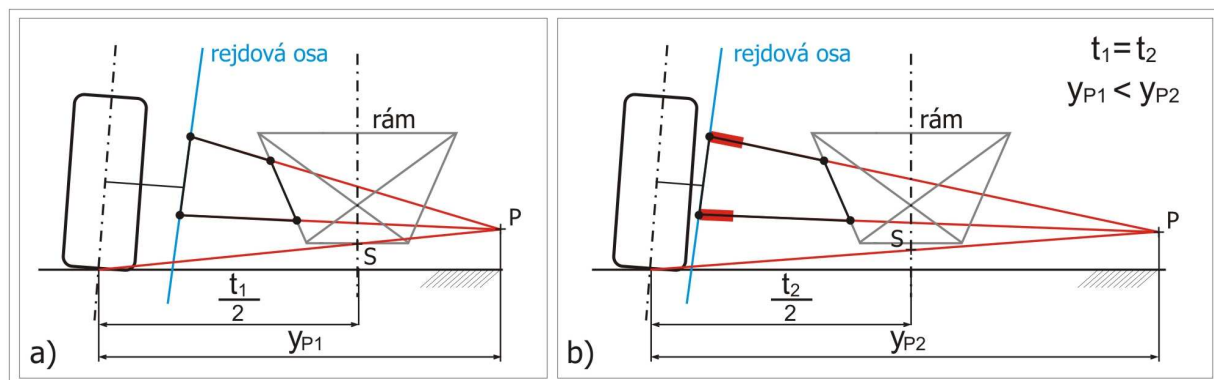
Obr. 17 Grafické porovnání rozsahu bump-steer, přední náprava, situace 3D bump
červeně – nejnižší možná poloha vnějšího kloubu řídicí tyče (poloha 1)
modře – nejvyšší možná poloha vnějšího kloubu řídicí tyče (poloha 2) [24]

propružení. Grafické porovnání rozsahu bump-steer v obou variantách lze vidět na obrázku 17. Dalšími změnami, kterými by šel průběh bump-steer ovlivnit, by byla například změna polohy řízení (resp. vnitřního kloubu řízení), nebo použití odlišné páky řízení. Tyto změny by však vyžadovaly daleko větší zásah do konstrukce podvozku.

U zadní nápravy lze díky konstrukci ramene, z něhož přímo vychází spojovací tyč (není vázána s rámem vozu), dosáhnout nulové hodnoty bump-steer (sbíhavost je v celém rozsahu propružení konstantní).

4.3 ZMĚNA ODKLONU KOL PŘI PROPRUŽENÍ

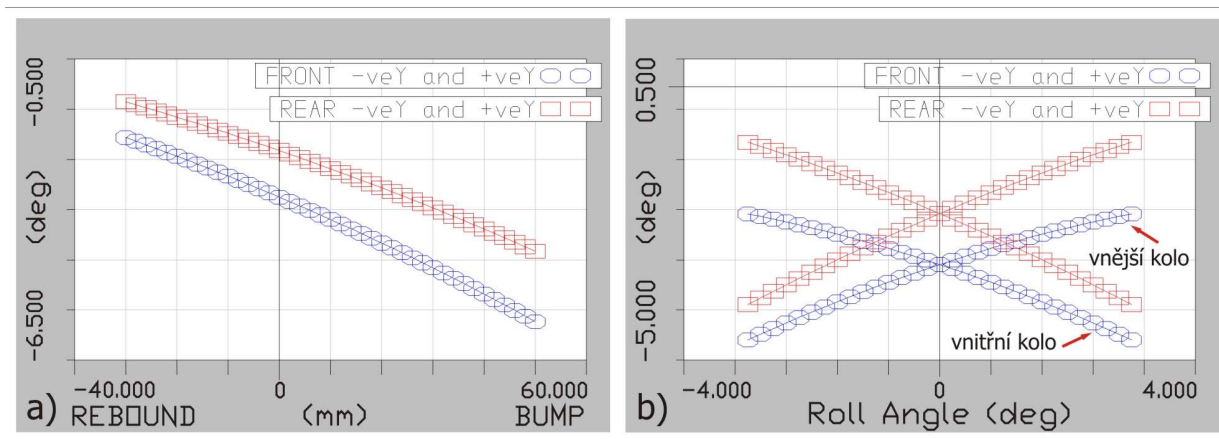
U lichoběžníkového zavěšení dochází při propružení kola vzhledem k nehybnému rámu (přejezd nerovnosti) nebo při naklonění rámu (průjezd zatáčkou) ke změně úhlu odklonu kola. Tato změna je ovlivněna geometrií ramen a to hlavně jejich sklonem a délkou v příčném směru. Čím větší tato délka bude, tím menšího rozsahu odklonu při stejné vertikální výchylce kola lze dosáhnout a přesněji tak definovat požadovaný rozsah hodnot úhlu odklonu. Jinými slovy čím dále od kola bude ležet střed klopení kola P , tím k menší změně odklonu a rozchodu kol bude



Obr. 18 Střed klopení kola P – a) výchozí stav, b) stav s prodlouženými rameny [25]

docházet (obr.18). Maximální využití prostoru pro zástavbu ramen lze vidět na obr. 10 c), kdy spodní ramena vycházejí téměř ze stejného bodu, ležícího v podélné svislé rovině symetrie monopostu. Tím je dosaženo minimální změny odklonu a rozchodu kol, obzvlášť v případě okruhových vozů, kde rozsah propružení není tak velký, jako v ostatních disciplínách. Na obrázku 19 je znázorněna změna odklonu kol v případě podvozku vozu Ginetta G50. Modrá křivka znázorňuje průběh změny na

přední nápravě, červená naopak u nápravy zadní. Hodnoty úhlů odklonu ve statické jízdní výšce (0 mm, 0° naklopení) vycházejí ze základního nastavení (příloha č.1). Popisky k obrázku 19 b) se vztahují na speciální případ, kdy vůz projíždí levotočivou zatáčku konstantní rychlostí, na jejíž velikosti závisí úhel naklopení rámu. Vlivem



Obr. 19 Průběh změny odklonu kol – a) přejezd nerovnosti, b) průjezd zatáčkou [24]

naklopení rámu se tak záporný odklon vnějšího kola zmenšuje, tím se pneumatika uchyluje k ideálnímu stavu (kolmá na vozovku) a umožňuje tak lepší zachycení bočních sil. Naopak záporný odklon vnitřního kola se zvětšuje, což je ale z pohledu postavení pneumatiky vůči vozovce nevýhodné. V reálném případě je však změna úhlu odklonu způsobena většinou kombinací těchto dvou případů (např. průjezd zatáčkou při současném brzdění). Nezanedbatelně hodnotu úhlu odklonu kola ovlivňuje také úhel záklonu rejdové osy a to hlavně při průjezdech zatáček s menším poloměrem, kdy jsou kola vychýlena do relativně velkého rejdu. Rozsah změny odklonu kol také obecně záleží na tuhosti použitého příčného stabilizátoru, který omezuje naklopení rámu v zatáčce, avšak na samotnou kinematiku podvozku vliv nemá. Použitím odlišných disků kol s větším profilem ET (zális), v krajním případě o 20 mm, by bylo možné získat přídavný prostor pro zástavbu delších ramen. K nasimulování této změny jsem opět použil stejný software. Po prodloužení každého ramene o hodnotu 20 mm se rozsah změny odklonu zmenšil o 8,4% v případě přední a o 7,4% v případě zadní nápravy při zachování stejného rozchodu kol i zbylých parametrů geometrie kromě poloměru rejdu, který by se za dané situace zmenšil. V případě takto malé změny by realizace těchto ramen vzhledem k dalším vynaloženým nákladům (delší poloosy, spojovací tyč řízení,...) nepřinášela odpovídající efekt.

5 MOŽNOSTI NASTAVENÍ PODVOZKU VOZU GINETTA G50

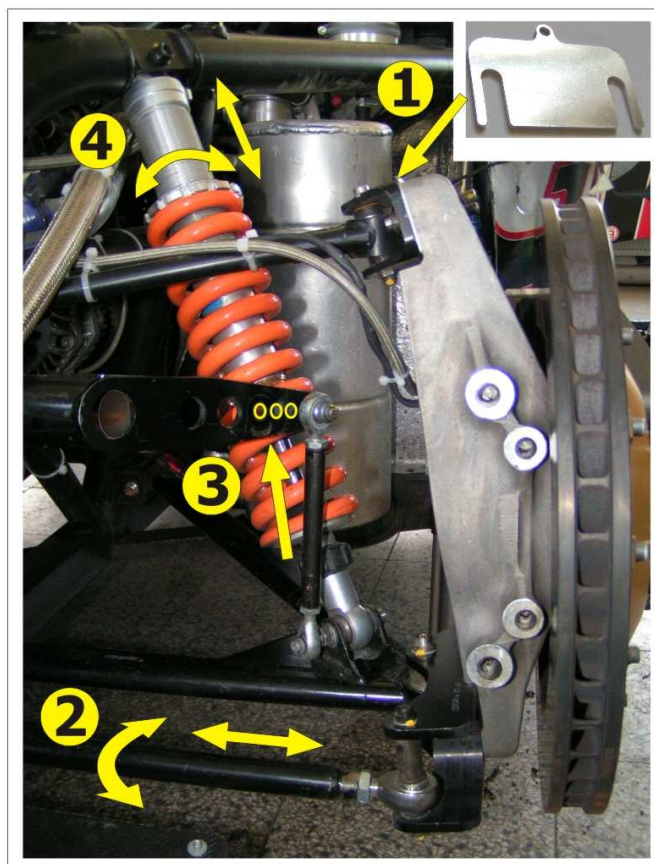
Aby byl potenciál závodního podvozku využit, je třeba najít optimální nastavení všech jeho částí, které zajistí maximální dynamiku vozu vzhledem k daným jízdním podmínkám. Jedná se o poměrně složitý proces, vyžadující vyhodnocení velkého obsahu průběžně získávaných dat a následné optimalizace nastavení jednotlivých parametrů. Často se stává, že se nastavení jednotlivých částí podvozku vzájemně ovlivňují a mnohdy jsou v rozporu. Zlepšení jednoho z parametrů tak může negativně ovlivnit ostatní a výsledný efekt bude opačný. V takovýchto případech je třeba určit nejvýhodnější kompromis. Nikdy například nelze zajistit ideální stav jak pro jízdu po rovině tak pro průjezd zatáčkou. V ideálním případě by testování vozu mělo probíhat vždy na okruhu, kde se následně odehrává samotný závod, a nastavit tak podvozek přímo na daný okruh. Avšak vzhledem k časové náročnosti a vysokým nákladům, spojených s realizací těchto testů, toto není pro většinu závodních týmů možné. Proto se často vůz nastaví podle získaných zkušeností z předešlých závodů či testování a korekce nastavení proběhne až při tréninku před závodem. Mezi faktory, ovlivňující nastavení podvozku, patří profil tratě (typ povrchu, charakter zatáček, délka rovných úseků, kvalita povrchu), charakter závodu, teplota povrchu a povětrnostní podmínky (sucho/déšť). Dalším faktorem může být i jízdní styl a cítění jezdce, jehož poznatky také mohou ovlivnit nastavení podvozku. Následuje přehled součástí podvozku vozu Ginetta G50, jejichž nastavením/záměnou lze ovlivnit chování vozu a přizpůsobit tak podvozek daným podmínkám.

5.1 VLIV NASTAVENÍ SOUČÁSTÍ PODVOZKU NA CHOVÁNÍ VOZU

5.1.1 Pneumatiky, geometrie kol

Použití vhodných pneumatik má vliv na chování vozu a správná volba při výběru pneumatik může rozhodnout o vítězství. Tým má k dispozici různé typy pneumatik, lišící se jak vzorkem (sucho/mokro) tak použitou tvrdostí směsi, která se volí s ohledem na teplotu povrchu tratě, nebo také délku závodu. Povrch pneumatiky by měl v ideálním případě udržovat konstantní teplotu po celé její šíři. Po přehřátí

povrchu pneumatiky klesá její účinnost a výsledkem je časová ztráta (zvolení příliš měkké směsi nebo nevhodné nahuštění). Teplota povrchu pneumatiky také úzce souvisí s nastavením geometrie kol, především sbíhavosti a odklonu kol, a proto je tato teplota během závodu pečlivě sledována. Odlišná teplota na vnější a vnitřní straně povrchu pneumatiky naznačuje její nestejně zatížení. Tuto skutečnost lze korigovat změnou odklonu kola pomocí podložek, vkládaných mezi hlavu kola a vnější kloub horního ramene (obr. 20 – 1). Dalším důležitým parametrem je tlak vzduchu v pneumatikách, jehož změnou jde rychle ovlivnit chování vozu. Vliv odklonu a sbíhavosti kol byl popsán v předchozích kapitolách.



Obr. 20 Nastavení podvozku vozu Ginetta G50

- 1) Nastavení odklonu kola
- 2) Nastavení sbíhavosti kol
- 3) Nastavení tuhosti stabilizátoru
- 4) Nastavení jízdní výšky [25]

5.1.2 Brzdový systém

Dalším parametrem je nastavení brzdového systému a to především rozložení brzdného účinku mezi přední a zadní nápravu – tzv. brake balance. Během jízdy se mění zatížení jednotlivých kol. Při brzdění je váha přenášena ze zadní na přední nápravu. Rozsah změny zatížení souvisí s výškou těžiště vozidla, vyvážením vozu ve statickém stavu, ale také například s efektem anti-dive. Z důvodu zamezení zablokování kol zadní, odlehčené, nápravy se nastavuje poměr brzdné síly kolem 60% ve prospěch přední nápravy. Opět se musí zvolit kompromis mezi jízdními stavy brzdění v zatáčce (odlišné zatížení předních kol), brzdění z velké rychlosti (vliv aerodynamiky) a brzdění při menších rychlostech.

5.1.3 Odpružení

Nastavením pružicí jednotky (použité pružiny, nastavení tlumiče – rebound, low-speed compression) lze ovlivnit nejen celková tuhost a charakteristika odpružení, ale také jízdní výška vozu, která se nastavuje s ohledem na kvalitu povrchu okruhu. Jízdní výška spolu s použitými pružinami mají vliv na přenášení zatížení z přední na zadní nápravu při akceleraci nebo brzdění. Při změně jízdní výšky se změní i hodnota odklonu kol a proto je nutné odklon korigovat. Dle výrobce vozu Ginetta G50 platí závislost 1 mm změna jízdní výšky = korekce úhlu odklonu kola o $\frac{1}{3}^\circ$ [11]. Nastavení jízdní výšky se provádí vyšroubováním matice, která tvoří horní opěrnou plochu pružiny (obr. 20 – 4).

5.1.4 Příčný stabilizátor

Na přední i zadní nápravě vozu je použit příčný stabilizátor, který umožňuje několik variant nastavení tuhosti. Na obrázku 20 – 3 je zobrazeno nastavení, které zajišťuje nejnižší možnou tuhost. Změnou polohy horního kloubu spojovací tyče lze tuhost zvyšovat. Stabilizátor ovlivňuje rozložení zatížení na levé a pravé kolo při průjezdu zatáčkou. Nastavením tuhosti lze ovlivnit nedotáčivé či přetáčivé chování vozu. Nastavení opět splňuje určitý kompromis. Například při akceleraci na výjezdu ze zatáčky má vnitřní zadní kolo vozu se zadní poháněnou nápravou tendenci prokluzovat. Zvýšením tuhosti předního (či snížením tuhosti zadního) stabilizátoru lze tomuto předejít, ovšem za cenu mírného ovlivnění směrové stability vozu (platí pro jízdu na suchém povrchu) [3]

5.2 VLIV NASTAVENÍ SBÍHAVOSTI KOL – ZADNÍ NÁPRAVA

Sbíhavost kol zadní nápravy neovlivňuje pouze směrovou stabilitu vozu při průjezdu zatáčkou (přetáčivost/nedotáčivost), ale také teplotní zatížení pneumatik. Vliv změny nastavení sbíhavosti na zadní nápravě vozu Ginetta G50 byl testován na ploše letiště v Hoškovicích, nedaleko Mnichova Hradiště. Na ploše byl pomocí kuželů nasimulován okruh se čtyřmi levotočivými zatáčkami o poloměru $r = 50$ m.

| Parametry měření | GINETTA G50 | | | |
|---|------------------------------------|--------|--------|--------|
| Použité pneumatiky vpředu | Michelin Slick 24/64-18 (směs S8E) | | | |
| Použité pneumatiky vzadu | Michelin Slick 25/64-18 (směs S8E) | | | |
| Celková hmotnost vozu (30 l paliva, jezdec) | 1180 kg | | | |
| Rozložení hmotnosti | LP | 280 kg | 278 kg | PP |
| | LZ | 298 kg | 324 kg | PZ |
| Odklon kol | vpředu | -4,25° | vzadu | -2,35° |
| Sbíhavost kol – přední náprava | 4 mm (rozbíhavost) | | | |

Tab. 1 Parametry měření [25]



Obr. 21 Testování – Letiště Hoškovice u Mnichova Hradiště [25]

Testovacím jezdce byl pan Jiří Gottwald, který se s totožným vozem účastní seriálu závodů GT4. Závodní vůz absolvoval při každé testovací jízdě pět okruhů vždy s odlišným nastavením sbíhavosti kol na zadní nápravě. Po každé jízdě byly zaznamenány teploty povrchu pneumatik a pocitové změny, které zaznamenal jezdec. Tlak v pneumatikách byl po jejich zahřátí udržován v rozmezí 2,0-2,1 bar a byl kontrolován po každé testovací jízdě. První jízdu vůz absolvoval s výchozím nastavením sbíhavosti kol zadní nápravy -4 mm. Teplota pneumatik na vnější straně vozu byla vlivem většího zatížení vyšší než na pneumatikách na vnitřní straně vozu. Vnitřní část pneumatik se zahřívala více, což svědčí o nastavení příliš velkého úhlu odklonu kol na obou nápravách pro tento charakter okruhu. Snížením úhlu odklonu kol by došlo k vyrovnání teplot po celé šíři pneumatik. Při druhé jízdě byla sbíhavost kol zadní nápravy přenastavena na -18 mm. Oproti předchozímu nastavení došlo k mírnému zhoršení směrové stability. Z hlediska teploty pneumatik se zadní vnější pneumatika zahřívala více na vnějším okraji. Situace na přední nápravě se nezměnila. Třetí jízdu vůz absolvoval s nastavením sbíhavosti 0 mm. Ve srovnání s předchozím nastavením se vůz choval stabilněji v nájezdu do zatáčky, ale naopak na výjezdu ze zatáčky působil nedotáčivě, což se projevilo mírně zvýšenou teplotou na vnější straně povrchu pravé přední pneumatiky. Povrch pravé zadní pneumatiky měl téměř konstantní teplotu, což zaručovalo její optimální funkčnost v zatáčce. Ve čtvrté jízdě byla nastavena rozbíhavost kol 9 mm. Pocitově se vůz choval lépe než předchozí nastavení, ale při brzdění působil mírně neklidně. Rozdíl teplot na povrchu pravé zadní pneumatiky byl obdobný jako při nastavení sbíhavosti -4 mm.

Při dalším zvyšování sbíhavosti (-18 mm) se začala zhoršovat směrová stabilita vozu. Naopak při kladných hodnotách sbíhavosti (rozbíhavost) vůz působil stabilněji v nájezdu do zatáčky, na úkor mírného zhoršení vlastností na výjezdu ze zatáčky, nebo při prudkém brzdění. Bohužel na takto krátkém okruhu nebylo možné objektivně porovnat časy jednotlivých kol. Z tohoto důvodu by bylo vhodné porovnat výchozí nastavení (-4 mm) s nastavením mírné rozbíhavosti (2 - 4 mm) na delším okruhu. Se změnou sbíhavosti kol by měl být korigován i odklon kola.

| Měření č.1 | | | | Sbíhavost kol zadní nápravy : -4 mm | | | | |
|---|-------------|-------|--------------|-------------------------------------|--------------|-------|-------------|----|
| Teplota na povrchu pneumatik po zkušební jízdě [°C] | | | | | | | | |
| | vnější část | střed | vnitřní část | | vnitřní část | střed | vnější část | |
| LP | 42 | 51 | 62 | | 67 | 70 | 61 | PP |
| LZ | 44 | 52 | 62 | | 71 | 72 | 63 | PZ |

| Měření č.2 | | | | Sbíhavost kol zadní nápravy : -18 mm | | | | |
|---|-------------|-------|--------------|--------------------------------------|--------------|-------|-------------|----|
| Teplota na povrchu pneumatik po zkušební jízdě [°C] | | | | | | | | |
| | vnější část | střed | vnitřní část | | vnitřní část | střed | vnější část | |
| LP | 41 | 50 | 55 | | 68 | 69 | 57 | PP |
| LZ | 43 | 58 | 53 | | 64 | 75 | 77 | PZ |

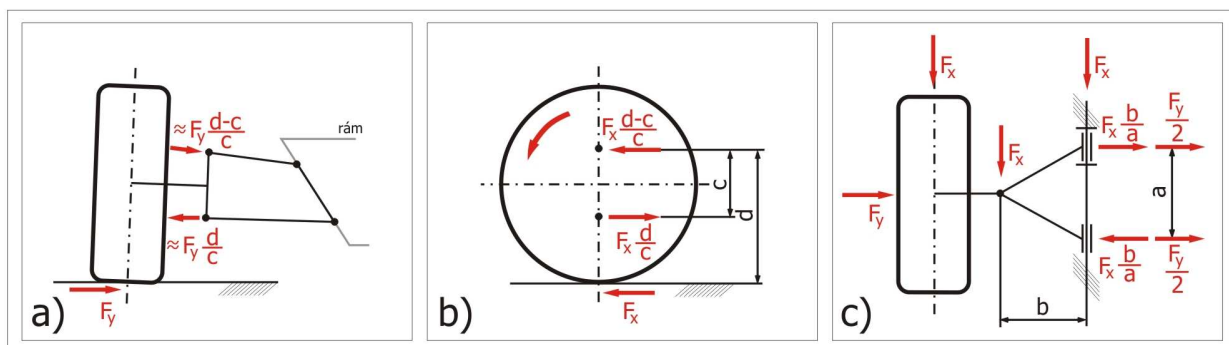
| Měření č.3 | | | | Sbíhavost kol zadní nápravy : 0 mm | | | | |
|---|-------------|-------|--------------|------------------------------------|--------------|-------|-------------|----|
| Teplota na povrchu pneumatik po zkušební jízdě [°C] | | | | | | | | |
| | vnější část | střed | vnitřní část | | vnitřní část | střed | vnější část | |
| LP | 39 | 49 | 58 | | 68 | 67 | 66 | PP |
| LZ | 39 | 50 | 56 | | 62 | 60 | 59 | PZ |

| Měření č.4 | | | | Sbíhavost kol zadní nápravy : 9 mm | | | | |
|---|-------------|-------|--------------|------------------------------------|--------------|-------|-------------|----|
| Teplota na povrchu pneumatik po zkušební jízdě [°C] | | | | | | | | |
| | vnější část | střed | vnitřní část | | vnitřní část | střed | vnější část | |
| LP | 47 | 53 | 61 | | 72 | 59 | 48 | PP |
| LZ | 50 | 66 | 61 | | 76 | 69 | 53 | PZ |

Tab. 2 Teploty povrchu pneumatik po testovacích jízdách [25]

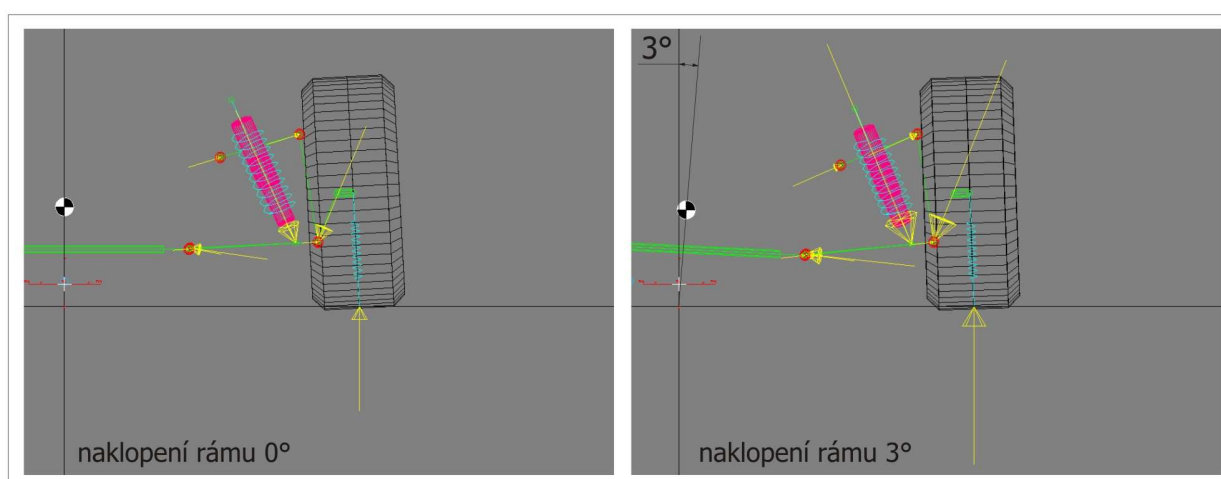
6 ZACHYCENÍ SIL NA LICHOBĚŽNÍKOVÉ NÁPRAVĚ

Mezi důležité funkce zavěšení nepatří pouze zajištění přesné kinematiky všech kol, ale také zabezpečení přenosu působících sil z kola na rám vozu. Na obrázku 22 je znázorněn přenos sil působících ve stopě (obvodová síla F_x , boční síla F_y)



Obr. 22 Zachycení bočních a obvodových sil na lichoběžníkové nápravě [1]

a hnacího popřípadě brzdného momentu M přes ramena na rám vozu. Vertikální zatížení F_z není znázorněno, protože je na rám přenášeno převážně pružinami [1]. Polohou uložení ramen v rámu lze ovlivnit poměr zatížení jednotlivých větví. Při průjezdu zatáčkou jsou spodní ramena namáhána na tlak a naopak horní na tah. To je patrné i z obrázku 23, kde je znázorněna změna velikosti působících sil při průjezdu zatáčkou. Při akceleraci nebo brzdění jsou ramena kvůli hnacímu resp. brzdnému momentu navíc namáhána ohybem (obr. 22 b). V reálném případě jsou ramena namáhána kombinovaně (například brzdění v zatáčce).



Obr. 23 Změna zatížení lichoběžníkového zavěšení – naklopení rámu 3° [24]

7 ZÁVĚR

Podvozek závodního vozu tvoří jednu z nejdůležitějších částí celého vozu. Jednotlivé prvky podvozkové skupiny spolu musí spolupracovat tak, aby zajistily maximální dynamiku vozu. Kinematiku kol a přenos působících sil z kola na rám vozu zajišťuje zavěšení kol. Současné závodní speciály využívají převážně nezávislé zavěšení kol, které disponuje mnoha výhodami. Konkrétní typ konstrukce zavěšení je pak volen s ohledem na požadavky, které musí prioritně splňovat. Každý typ nezávislého zavěšení má jiné výhody i nevýhody a tak musí konstruktéři mnohdy zvolit určitý kompromis. Vypracovaný přehled používaných typů zavěšení kol v automobilovém sportu je toho důkazem.

Podrobnějším rozbořem podvozku závodního speciálu Ginetta G50 a vytvořením funkčního kinematického modelu podvozku v programu Lotus Suspension Analysis, bylo možné analyzovat kinematiku lichoběžníkového zavěšení, včetně průběhu změn geometrie kol v různých jízdních situacích. Pomocí tohoto softwaru bylo možné určit také polohu vnějšího kloubu spojovací tyče řízení, která vykazovala nejmenší rozsah „bump-steer“. Dále bylo možné zjistit závislost délky ramen v příčném směru na rozsahu změny odklonu kol.

Aby vůz dosahoval nejlepších výsledků, musí být podvozek optimálně nastaven vzhledem k aktuálním jízdním podmínkám. Nalezení odpovídajícího nastavení vyžaduje nejen dokonalou znalost vozu, ale především mnoho hodin testování, zkoušení a sbírání dat, které jsou následně vyhodnocovány. Některé části nastavení („bump-steer“, kinematika kol, anti-dive,...) lze nasimulovat pomocí daného softwaru, avšak efektivita případných změn musí být ověřena v praxi. Díky společnosti Blue engineering s.r.o. jsem měl možnost účastnit se testování závodního vozu v praxi a získat tak zajímavou zkušenost.

Seznam použité literatury

- [1] Vlk, F.: Podvozky motorových vozidel, 1. Vydání, nakladatelství a vydavatelství VLK, , Brno 2006 ISBN 80-239-6464-X
- [2] Vlk, F.: Dynamika motorových vozidel, 1. vydání, nakladatelství a vydavatelství VLK, Brno 2000 ISBN 80-238-5273-6
- [3] Milliken, W., F., Milliken, D., L.: Race car vehicle dynamics, II. Title, SAE International, Warrendale 1954, ISBN 1-56091-526-9
- [4] Pilárik, M., Pabst, J.: Automobily I., 2. přepracované vydání, nakladatelství Informatorium, Praha 2005, ISBN 80-7333-035-0
- [5] Prof. Dipl.-Ing. Reimpell, J., Dipl.-Ing. Stoll, H., Prof. Dr.-Ing. Betzler, J., W.: The Automotive Chassis: Engineering Principles, Second edition, Butterworth-Heinemann 2001, ISBN 0- 7506-5054-0
- [6] Formula1.com -
http://www.formula1.com/inside_f1/understanding_the_sport/5285.html [online - 22.5.2011]
- [7] Protlum.eu - http://www.protlum.eu/produkty_tr.html [online - 22.5.2011]
- [8] Autoklub.cz -
<http://www.autoklub.cz/show.php?page=acr/fasacr/fasacr/discipliny/index.htm&asoc=2> [online - 22.5.2011]
- [9] Autoklub.cz -
<http://www.autoklub.cz/show.php?page=acr/fasacr/radyfia/prilohaj/index.htm&asoc=2htrhrh> [online - 22.5.2011]
- [10] Gt4cup.com - <http://gt4cup.com/downloads.php> [online - 22.5.2011]
- [11] Ginetta.com - <http://www.ginetta.com/pdfs/G50BuildManual.pdf>
[online - 22.5.2011]
- [12] Ford Fiesta WRC – willyweyens.com,
<http://willyweyens.com/gallery/albums/userpics/10004/WIWLATVALA-29.JPG>
[online - 22.5.2011]
- [13] Přední zavěšný vozu Ford Fiesta WRC - crash.net,
<http://pix.crash.net/motorsport/360/PA883484.jpg> [online - 22.5.2011]
- [14] Zadní zavěšný vozu Ford Fiesta WRC – cash.net,
<http://pix.crash.net/motorsport/360/PA883483.jpg> [online - 22.5.2011]

- [15] Citroën C4 D1 - ewrc.cz,
http://www.ewrc.cz/images/2010/ostatni/rallycross/lk_a_133_ostatni_8.jpg
[online - 22.5.2011]
- [16] Zadní zavěšení vozu Citroën C4 D1 - rallycross.com,
http://www.rallycross.com/sales_db/viewoffer.php?id=2733&lang_id=0
[online - 22.5.2011]
- [17] Citroën C4 D1 - ewrc.cz,
http://www.ewrc.cz/images/2010/ostatni/rallycross/lk_a_133_ostatni_38.jpg
[online - 22.5.2011]
- [18] Nissan 350Z GT4 - gt4cup.com,
<http://gt4cup.com/gallerypic.php?countkey=1&key=881&season=2010&event=1>, http://www.350z-tech.com/wiki/images/f/f3/350z_suspension_image.jpg
[online - 22.5.2011]
- [19] Aston Martin Vantage - gt4cup.com,
<http://gt4cup.com/gallerypic.php?countkey=2&key=884&season=2010&event=1> [online - 22.5.2011]
- [20] Porsche 911 - gt4cup.com,
<http://gt4cup.com/gallerypic.php?countkey=29&key=912&season=2010&event=1> [online - 22.5.2011]
- [21] Přední zavěšení monopostu F1 – team-bhp.com, <http://www.team-bhp.com/forum/attachments/technical-stuff/204823d1254924957-pics-video-red-bull-formula-1-car-assembly-engine-fire-up-mumbai-p1000721.jpg>
[online - 22.5.2011]
- [22] Scholz C., Němeček P.: Dopravní a manipulační technika,
http://www.kvm.tul.cz/studenti/texty/Dopravni_technika/P_DT_Jizdni_ustroji_3.pdf [online - 22.5.2011]
- [23] Kloubové ložisko uniball - oocities.org
http://www.oocities.org/tuoppi_00970/english/uniball.jpg [online - 22.5.2011]
- [24] Export ze softwaru Lotus Suspension Analysis - <http://www.lesoft.co.uk/>
- [25] Vlastní zdroje

Seznam příloh

Příloha č.1: Základní nastavení podvozku Ginetta G50 (tabulka)

Příloha č.2: Geometrie ramen, uložení v rámu (obrázek)

Příloha č.3: Průběh geometrie při propružení – přední náprava (grafy)

Příloha č.4: Průběh geometrie při propružení – zadní náprava (grafy)

Příloha č.5: Schéma pozice kola – přední náprava (obrázek)

Příloha č.6: Schéma pozice kola – zadní náprava (obrázek)

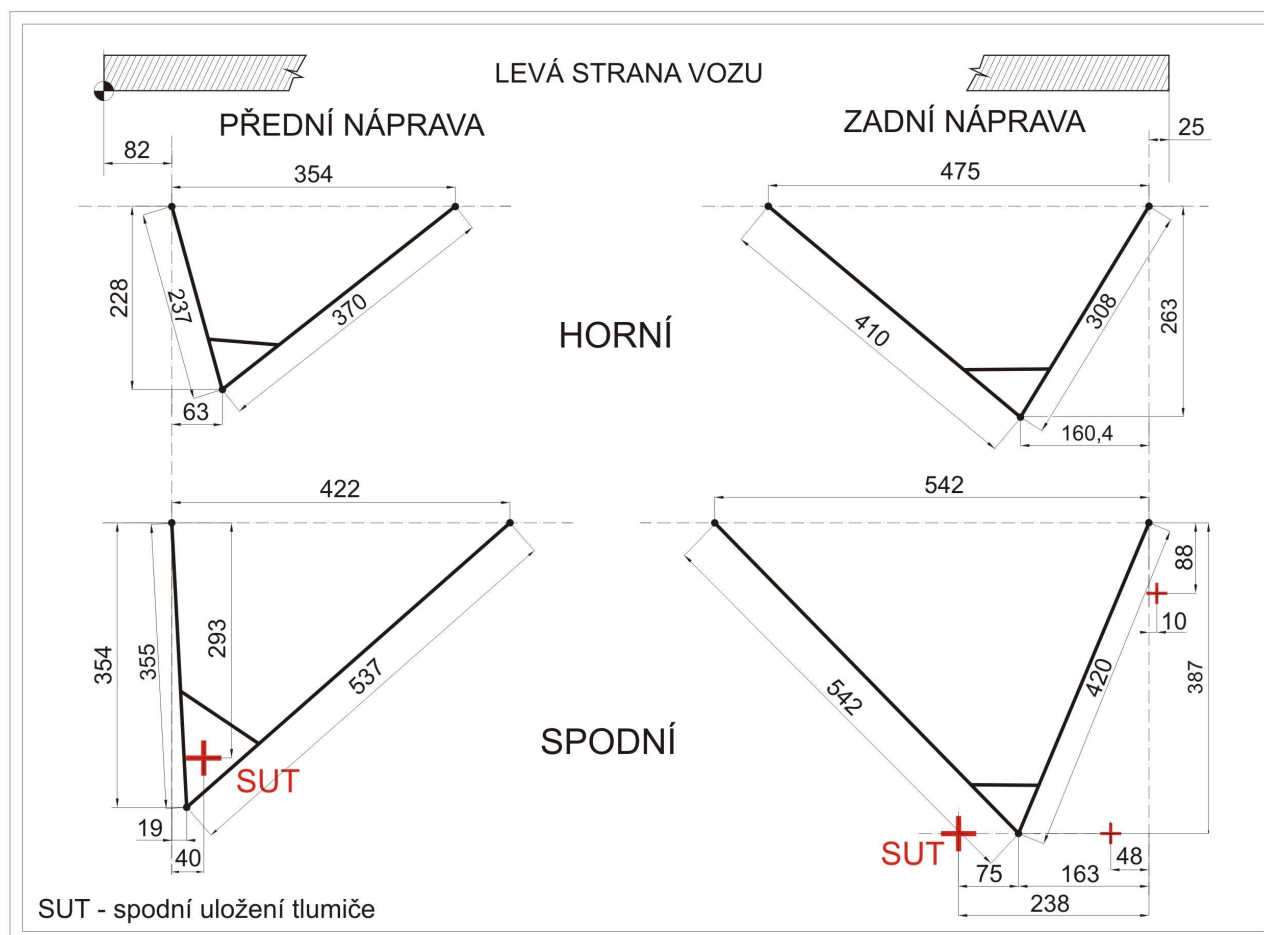
Příloha CD - ginettaG50.shk (kinematický model)

- BP_Dorotka_Martin_2011.pdf

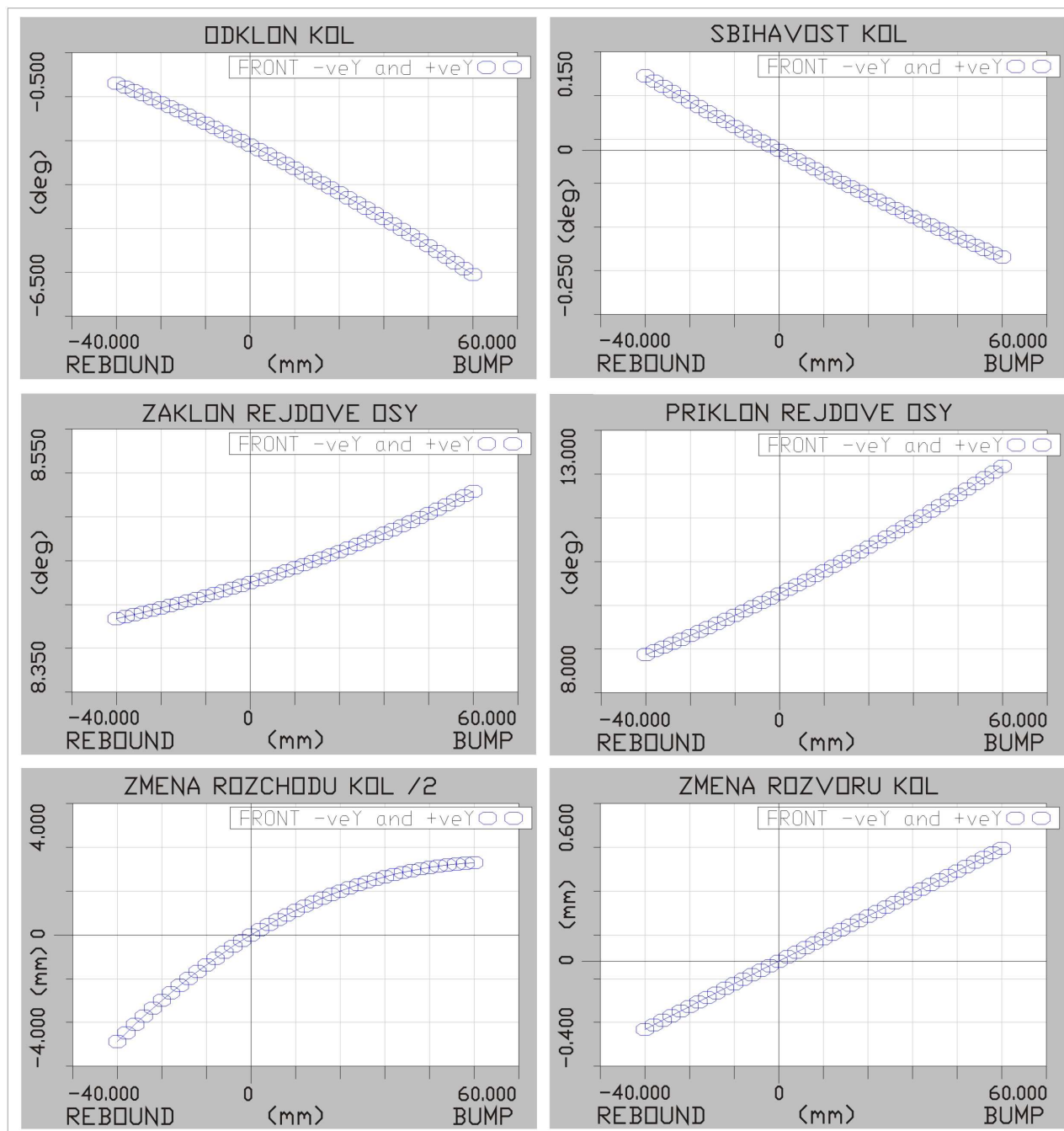
Příloha č.1: Základní nastavení podvozku Ginetta G50 [11]

| Základní nastavení | Přední náprava | Zadní náprava |
|---------------------|----------------|---------------|
| Odklon kola | -3,25° | -2,00° |
| Použité podložky | 8 mm | 4 mm |
| Sbíhavost | 1 mm OUT | 2 mm IN |
| Příklon rejdové osy | 9,9° | 8,5° |
| Poloměr rejdu | 83 mm | 89 mm |
| Záklon rejdové osy | 8,4° | 0,5° |
| Závlek | 47 mm | 3 mm |
| Jízdní výška | 62 mm | 72 mm |

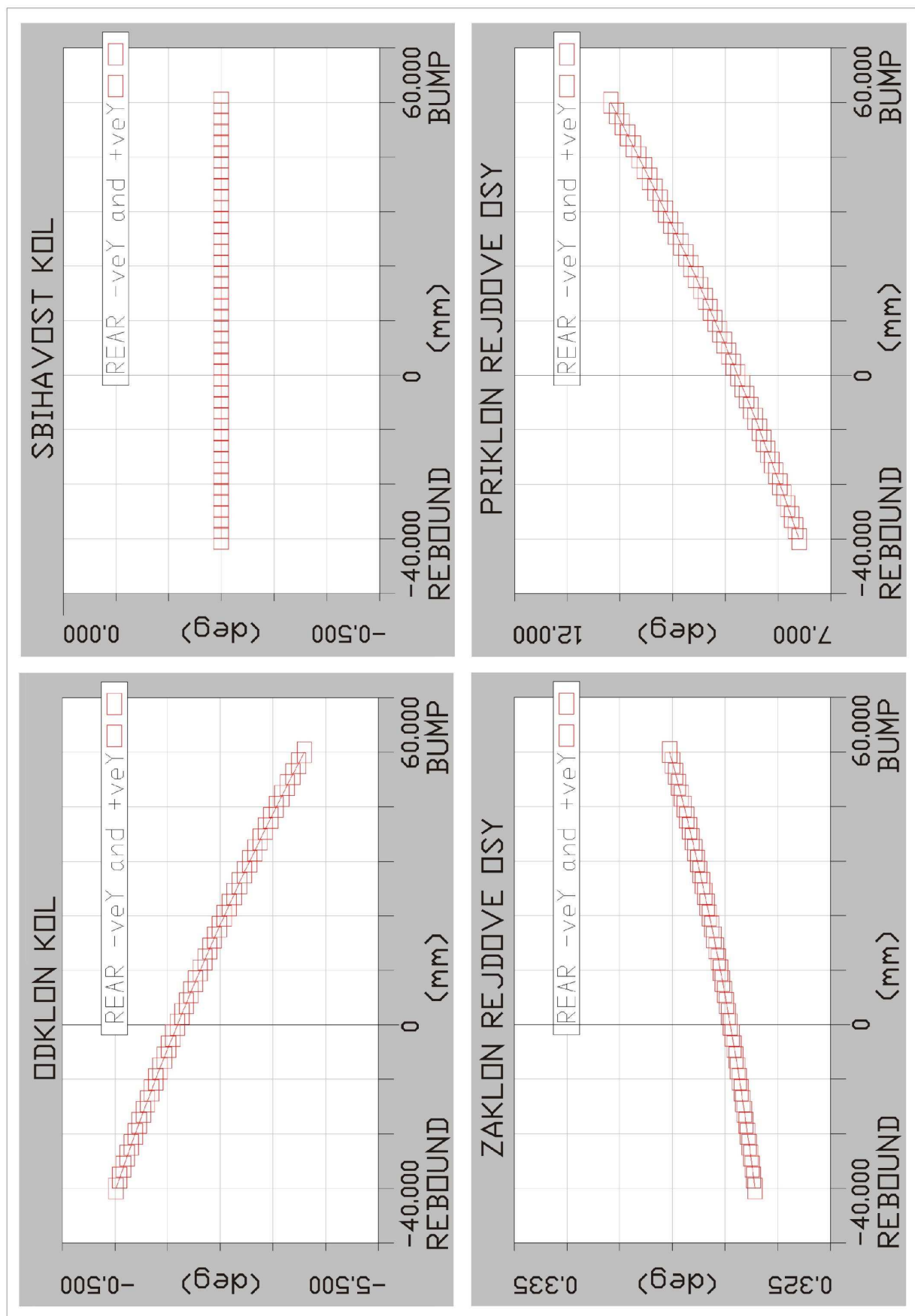
Příloha č.2: Geometrie ramen [25]



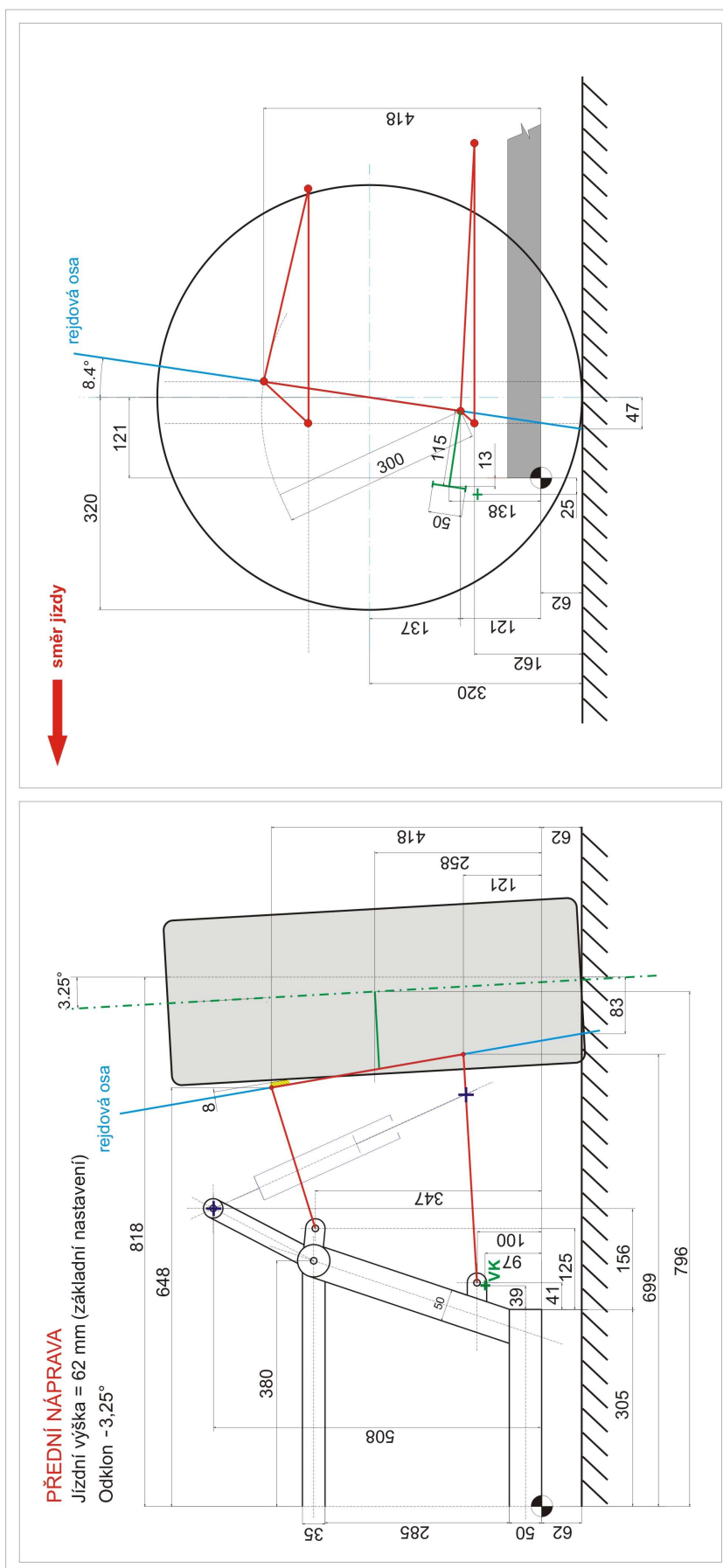
Příloha č.3: Grafy průběhu geometrie – přední náprava – 3D bump [24]



Příloha č.4: Grafy průběhu geometrie – zadní náprava – 3D bump [24]



Příloha č.5: Schéma pozice kola – přední náprava [25]



Příloha č.6: Schéma pozice kola – zadní náprava [25]

